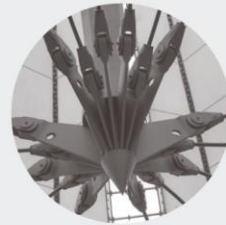
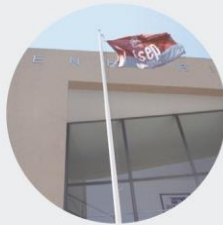


Otimização Energética da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água em Alta

ANA MARGARIDA CERQUEIRA GONÇALVES DIAS

novembro de 2016



Otimização Energética da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água em Alta

ANA MARGARIDA CERQUEIRA GONÇALVES DIAS

Novembro de 2016

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM ALTA

ANA MARGARIDA CERQUEIRA GONÇALVES DIAS

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE INFRAESTRUTURAS

Orientador: Engenheiro Eduardo Bruno de Freitas Vivas

Supervisor: Engenheiro Pedro Miguel Leite Ferreira (H2OPT)

NOVEMBRO DE 2016

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos.....	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas	xix
1 Introdução	1
2 Revisão bibliográfica	5
3 <i>Softwares</i> utilizados.....	29
4 Metodologia Aplicada	37
5 Considerações Finais.....	93
Referências Bibliográficas	95

RESUMO

O presente documento apresenta um relatório elaborado no âmbito de um estágio curricular na empresa H2OPT, com a duração de seis meses, que teve como tema otimização energética da operação de sistemas de abastecimento de água em alta. O objetivo proposto foi participar no processo de elaboração e análise de uma ferramenta de otimização, que tirando partido dos Algoritmos Genéticos, permite otimizar ao nível energético os sistemas de abastecimento de água.

De uma forma introdutória, é feito o enquadramento do tema e são definidos os objetivos para a realização do estágio, definindo um cronograma de trabalhos.

É também feita uma abordagem teórica ao tema, partindo de uma breve definição sobre sistemas de abastecimento de água e seus componentes, assim como uma análise sobre otimização energética e os vários métodos utilizados nesta temática.

A ferramenta de otimização em causa é desenvolvida em linguagem *Python* com possibilidade de utilização de packages previamente desenvolvidos, tendo sido utilizado o compilador *PyCharm*. Para esta ferramenta utilizou-se o *package Pyevolve* que aplica Algoritmos Genéticos para a resolução do problema de otimização. Para o desenvolvimento da ferramenta também foi utilizado o simulador hidráulico EPANET, onde é possível obter a configuração da rede de abastecimento a considerar, assim como as características do sistema. Foi ainda criando um ficheiro Excel onde foram inseridos alguns dados básicos sobre o exemplo em estudo, por forma a permitir ao utilizador uma forma simplificada de interagir com a ferramenta.

No que diz respeito ao objetivo principal deste relatório, que se prendia na descrição do que foi permitido estudar ao longo do período de estágio, descreveu-se a metodologia utilizada no estudo da ferramenta de otimização, como a participação no processo de *debug* e a sugestão algumas melhorias na ferramenta. Foram para isso realizadas análises de sensibilidade das funcionalidades oferecidas pela ferramenta, nomeadamente no que respeita aos parâmetros utilizados pelo Algoritmo Genético, que também são descritas no corpo deste relatório, assim como a pesquisa efetuada previamente que serviu de base para a interpretação dos resultados.

Palavras-chave: Otimização energética, sistemas elevatórios, *Pyevolve*, *EPANET*

ABSTRACT

The following document presents a report developed within an internship under purview of the company H2OPT, with a duration of six months, with the subject of energy optimization for high water supply systems operation. The proposed goal was to participate in the formulation and analysis process of an optimization tool, which taking advantage of genetic algorithms, allows to optimize the necessary energy to run a water supply system.

As an introduction, there's a framework of the subject and the objectives for the duration of the internship are defined, by setting a schedule of works.

There is also a theoretical approach to the subject, starting with a brief description of water supply systems and their components, as well as analysis of energy optimization and the various methods used in this matter.

The optimization tool in question is developed in *Python* programming language, which allows the usage of previously developed packages, having been used the compiler *Pycharm*. For this tool, the used package was *Pyevolve*, which applies genetic algorithms to solve the optimization proposition. EPANET software was also used in the development of the before mentioned tool, which is a hydraulic simulator that makes it possible to obtain the configuration of the supply network to consider, as well as the system's features. An Excel file containing some basic data about the sample under study was also created, so as to allow the user a simple way to interact with the tool.

Regarding the main objective of this report, which consisted in the description of what was studied during the internship period, it's chosen to describe the methodology used in the study of the optimization tool, such as the participation in the debugging process and suggestion of some improvements on the tool. For that, sensitivity analysis of its functionalities were held, particularly with regard to the parameters used by the genetic algorithm, which are also described in this report, as well as the research previously conducted that formed the basis for the interpretation of results.

Keywords: Energy optimization, pumping systems, Pyevolve, EPANET

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Engenheiro Eduardo Vivas pela dedicação, compreensão, exigência e disponibilidade que sempre demonstrou ao longo de todo o estágio, ajudando a que conseguisse concluir com satisfação pessoal este desafio.

Ao meu orientador por parte da empresa, Engenheiro Pedro Leite, por toda a ajuda e paciência inesgotável que demonstrou na minha orientação.

À minha mãe, ao meu pai e à minha irmã, por toda a força, carinho, confiança e alento que sempre demonstraram.

Ao Paulo Sengo pela ajuda prestada e por toda a força e confiança que sempre me transmitiu.

À Isabel Amorim, por todo o carinho, preocupação e apoio incessante.

À Tânia Sousa, por toda a força.

À Sofia Moreira pelo companheirismo.

A todos os meus colegas e amigos que me acompanharam nesta jornada, contribuindo sempre de forma positiva.

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e Objetivos.....	1
1.2	Descrição da Empresa	2
1.3	Estrutura do Relatório.....	3
2	Revisão bibliográfica	5
2.1	Sistemas de abastecimento.....	5
2.1.1	Obras de captação:	5
2.1.2	Estações elevatórias e sobrepessoras:	6
2.1.3	Adutoras, aquedutos e canais:	7
2.1.4	Estações de tratamento de água (ETA):	8
2.1.5	Reservatórios:	9
2.2	Otimização energética	10
2.2.1	Conceitos base	10
2.2.2	Indicadores de eficiência energética	15
2.2.3	Fatores que influenciam a otimização	17
2.2.4	Métodos matemáticos	22
2.2.5	Exemplos de aplicação de Métodos Matemáticos	26
3	<i>Softwares</i> utilizados.....	29
3.1	Simulador hidráulico – epanet	29
3.1.1	Descrição geral.....	29
3.1.2	Componentes físicos da rede	30

3.1.3	Componentes não físicos da rede.....	32
3.1.4	Simulações e Resultados	33
3.2	<i>PyCharm</i>	36
4	Metodologia Aplicada	37
4.1	Breve Descrição da Ferramenta de Otimização	37
4.2	Exemplo Utilizado	39
4.2.1	Componentes gerais do sistema:.....	40
4.2.2	Tarifas de energia aplicadas	40
4.3	Análise de Sensibilidade Utilizando o <i>EPANET</i>	41
4.4	Ligação Dinâmica do <i>Python</i> à Biblioteca de Funções do <i>EPANET</i>	42
4.4.1	Exemplo de Aplicação	43
4.5	<i>Pyevolve</i>	46
4.5.1	Operadores Genéticos	46
4.5.2	Análise de Sensibilidade.....	49
4.5.3	Critérios de Paragem.....	91
5	Considerações Finais.....	93
5.1	Conclusões.....	93
5.2	Desenvolvimentos Futuros.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Cronograma de tarefas	2
Figura 1.2 – Logotipo da empresa	2
Figura 2.1 – Ilustrações dos diferentes tipos de captação.....	6
Figura 2.2 – Interior da Estação Elevatória de Alcanhões, Santarém. (adp.pt, 2016)	6
Figura 2.3 – Vários tipos de turbobombas (Oliveira, 2015).	7
Figura 2.4 – Conduto adutora Pedrouços-Nogueira II. (Noraqua.pt, 2006)	8
Figura 2.5 – Imagem do exterior da ETA de Tavira (aguasdoalgarve.pt, 2016).....	9
Figura 2.6 – Exemplo de reservatório (Águas do Norte, 2015).	10
Figura 2.7 – Curva característica da instalação (Grundfos, 2005)	11
Figura 2.8 – Diagrama em mosaico para a seleção de bombas da marca Multitec, para a velocidade de rotação de 2900 rpm (KSB, 2016)	12
Figura 2.9 – Curva característica da bomba e curva da instalação e representação do ponto de funcionamento (Sousa, 2001)	13
Figura 2.10 - Associação de bombas e respetivas curvas características (DOE&HI, 2006)	14
Figura 2.11 - Representação do BEP (DOE&HI, 2006).....	14
Figura 2.12 – Escala de classificação do índice GPX, de acordo com o funcionamento atual e o que poderá atingir (exemplo). (Vivas et al, 2014)	17
Figura 2.13 – Consequência da alteração do diâmetro do impulsor no ponto de funcionamento (DOE &HI, 2006)	19
Figura 2.14 – Variação do ponto de funcionamento, segundo as curvas de isso-eficiência, com variador de velocidade (DOE et al,2004)	20
Figura 2.15 – Efeito dos variadores de velocidade nos grupos eletrobomba (Rodrigues, 2016).	21
Figura 2.16 - Representação Sequencial do funcionamento do AG. (Adaptado de Cunha, 2009).....	25

Figura 3.1 – Exemplo da representação de uma rede no EPANET (Manual do utilizador, 2002),	29
Figura 3.2 – Componentes físicos de um sistema de distribuição de água (LNEC, 2004).....	31
Figura 3.3 – Valores de pressão nos nós e caudal nas tubagens, através de um padrão de cores. Exemplo de uma rede. (EPANET exemples, 2002).	34
Figura 3.4 – Exemplo de um gráfico que ilustra os valores de pressão no reservatório, ao longo do período de simulação, (EPANET exemple, 2000).....	34
Figura 3.5 – Exemplo de uma tabela que ilustra os valores que variam ao longo da simulação, numa determinada tubagem (EPANET, exemple, 2000)	35
Figura 3.6 – Exemplo de tabela que reporta a energia despendida ao longo da simulação (EPANET exemple, 2000)	35
Figura 4.1 – Exemplo do Ficheiro de importação de dados	38
Figura 4.2 – Representação do exemplo utilizado	39
Figura 4.3 - Curvas caraterísticas do grupo	40
Figura 4.4 – Resultados da rotina de análise das funções de ligação.	45
Figura 4.5 - Rotinas de cruzamento (<i>crossover</i>) (Obitko, 1998)	48
Figura 4.6 – Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 40 gerações.	50
Figura 4.7 – Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 40 gerações.....	50
Figura 4.8 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 50 gerações.	51
Figura 4.9 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 50 gerações.....	51
Figura 4.10 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 80 gerações.	52
Figura 4.11 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 80 gerações.....	52
Figura 4.12 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 500 gerações e uma população de 200 elementos.	53

Figura 4.13 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 500 gerações e uma população de 200 elementos	54
Figura 4.14 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 500 gerações e uma população de 500 elementos	54
Figura 4.15 - - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 500 gerações e uma população de 500 elementos	55
Figura 4.16 – Variação do valor de score ao longo da evolução do Algoritmo para a simulação de 7000 indivíduos e 1000 gerações.	56
Figura 4.17 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 1000 gerações e uma população de 1000 elementos.	57
Figura 4.18 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 1000 gerações e uma população de 1000 elementos	57
Figura 4.19 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 1000 gerações e uma população de 7000 elementos.	58
Figura 4.20 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 1000 gerações e uma população de 7000 elementos	58
Figura 4.21 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DListInitializerInteger</i>	60
Figura 4.22 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DListInitializerInteger</i>	60
Figura 4.23 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringInitializer</i>	61
Figura 4.24 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringInitializer</i>	61
Figura 4.25 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DListMutatorIntegerBinary</i>	62
Figura 4.26 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DListMutatorIntegerBinary</i>	63
Figura 4.27 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringMutatorFlip</i>	63

Figura 4.28 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringMutatorFlip</i>	64
Figura 4.29 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringMutatorSwap</i>	64
Figura 4.30 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringMutatorSwap</i>	65
Figura 4.31 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DListMutatorIntegerGaussian</i>	65
Figura 4.32 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DListMutatorIntegerGaussian</i>	66
Figura 4.33 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DListMutatorIntegerRange</i>	66
Figura 4.34 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DListMutatorIntegerRange</i>	67
Figura 4.35 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>GRankSelector</i>	68
Figura 4.36 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>GRankSelector</i>	68
Figura 4.37 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>GRouletteWheel</i>	69
Figura 4.38 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>GRouletteWheel</i>	69
Figura 4.39 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>GTournamentSelector</i>	70
Figura 4.40 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>GTournamentSelector</i>	70
Figura 4.41 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>GUniformSelector</i>	71
Figura 4.42 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>GUniformSelector</i>	71

Figura 4.43 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringXSinglePoint</i>	73
Figura 4.44 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringXSinglePoint</i>	73
Figura 4.45 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringXTwoPoint</i>	74
Figura 4.46 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringXTwoPoint</i>	74
Figura 4.47 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringXUniform</i>	75
Figura 4.48 - - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>G1DBinaryStringXUniform</i>	75
Figura 4.49 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para os operadores selecionados.	77
Figura 4.50 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para os operadores selecionados	77
Figura 4.51 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 90 % e Mutação de 3%	78
Figura 4.52 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 90 % e Mutação de 3%	79
Figura 4.53 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 90 % e Mutação de 1%	79
Figura 4.54 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 90 % e Mutação de 1%	80
Figura 4.55 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 80 % e Mutação de 1%	80
Figura 4.56 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 80 % e Mutação de 1%	81
Figura 4.57 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 95 % e Mutação de 1%	81

Figura 4.58 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 95 % e Mutação de 1%.....	82
Figura 4.59 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>LinearScaling</i>	84
Figura 4.60 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>LinearScaling</i>	85
Figura 4.61 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>BoltzmannScaling</i>	85
Figura 4.62 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>BoltzmannScaling</i>	86
Figura 4.63 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>ExponentialScaling</i>	86
Figura 4.64 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>ExponentialScaling</i>	87
Figura 4.65 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>PowerLawScaling</i>	87
Figura 4.66 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>PowerLawScaling</i>	88
Figura 4.67 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>SaturatedScaling</i>	88
Figura 4.68 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>SaturatedScaling</i>	89
Figura 4.69 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>SigmaTruncScaling</i>	89
Figura 4.70 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para <i>SigmaTruncScaling</i>	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Tarifas de energia.....	41
Tabela 4.2 - Parâmetros a considerar em todas as análises	49
Tabela 4.3 – Custo específico resultado das simulações	53
Tabela 4.4 - Custo específico resultado das simulações	55
Tabela 4.5 - Custo específico resultado das simulações	56
Tabela 4.6 - Custo específico resultado das simulações	62
Tabela 4.7 - Custo específico resultado das simulações	67
Tabela 4.8 - Custo específico resultado das simulações	72
Tabela 4.9 - Custo específico resultado das simulações	76
Tabela 4.10 – Combinação de operadores a considerar.....	76
Tabela 4.11 - Custo específico resultado de cada análise.....	82
Tabela 4.12 - Custo específico resultado das simulações	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A operação de abastecimento de água tem como objetivo satisfazer as necessidades do consumo, reduzindo ao máximo os custos operacionais, os custos de consumo de energia e os custos de manutenção. Para tal, torna-se essencial um melhor aproveitamento do sistema de transporte e armazenamento da água.

No presente relatório será analisado o potencial de otimização energético de um sistema em “alta”, sendo portanto importante referir as diferenças entre um sistema em “alta” e um sistema em “baixa”. Ao conjunto de componentes localizados a montante da rede de distribuição (captação, tratamento e fornecimento aos reservatórios) dá-se o nome de sistema em “alta”, fazendo este a ligação ao sistema em “baixa” que é o conjunto de elementos que fazem o abastecimento ao utilizador final.

A operação de um sistema de abastecimento é feita através da gestão dos seus constituintes, como reservatórios e sistemas elevatórios, garantindo as necessidades de consumo e reduzindo tanto quanto possível os custos operacionais. No caso de um sistema em “alta” os principais custos operacionais variáveis são os custos de tratamento (reagentes, por exemplo) e os custos de energia (quer na fase de tratamento, quer na elevação).

Concentrando nos custos de energia na fase de elevação, o objetivo proposto para a realização do estágio curricular foi participar na construção de uma ferramenta de otimização em desenvolvimento por parte da empresa, que permitisse com base na análise de um sistema de abastecimento, avaliar qual a gestão mais vantajosa que pode ser feita do funcionamento dos grupos eletrobomba, para a minimização dos custos com a energia. Para tal, a ferramenta utiliza Algoritmos Genéticos como ferramenta de otimização, com o apoio de o simulador hidráulico EPANET. Os Algoritmos Genéticos são aplicados utilizando o package da plataforma *Pyevolve* existente na plataforma utilizada *PyCharm*.

Devido à complexidade do desafio sugerido, tornou-se necessário gerir o tempo de realização de cada tarefa. Para tal foi elaborado um cronograma de tarefas, com a duração do estágio (Fevereiro até Julho de 2016). Foi então dividido o trabalho em etapas que serão definidas em seguida:

1. Realização de uma revisão bibliográfica aprofundada sobre o tema, abordando tanto a questão da otimização em sistemas de abastecimento, como aprofundado a questão da aplicação dos Algoritmos Genéticos a estes sistemas.
2. Tomar conhecimento do simulador hidráulico EPANET, realizando análises de sensibilidade utilizando um exemplo base
3. Aplicar a DLL de ligação do simulador hidráulico à linguagem de programação utilizada na elaboração da ferramenta
4. Análise da ferramenta, participando no processo de *debug* e de aplicação do Algoritmo Genético.

Na Figura 1.1 é apresentado o cronograma de tarefas que de uma forma geral foi cumprido na realização do estágio.

TAREFAS	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO
1						
2						
3						
4						

Figura 1.1 - Cronograma de tarefas

1.2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

O estágio curricular decorreu na empresa H2OPT (Figura 1.2), do Grupo Noraqua, especializada na otimização de sistemas hidráulicos, tentando responder às necessidades emergentes de melhoria dos sistemas hidráulicos ao nível da sustentabilidade e eficiência, nomeadamente sistemas de abastecimento de água e sistemas de águas residuais. A empresa tem sede na Rua Monte Cativo, 313, Porto.



Figura 1.2 – Logotipo da empresa

A H2OPT está atualmente em expansão e é especializada em serviços técnicos para a otimização de sistemas hidráulicos, atuando essencialmente em quatro áreas:

OPT EFE - Eficiência energética (SAA e SAR):

- Testes de eficiência de grupos eletrobomba
- Planos de manutenção preditiva
- Soluções de otimização energética
- Planos de otimização energética

OPT CAI - Controlo de afluências indevidas (SAR):

- Análise e caracterização da situação atual
- Campanhas de medição
- Modelação do sistema
- Plano de controlo de afluências indevidas

OPT CFP- Controlo de fugas e perdas (SAA):

- Avaliação e caracterização da situação atual
- Definição de estratégias de controlo ativo
- Modelação do sistema
- Apoio ao controlo de fugas e perdas

OPT GPI - Gestão Patrimonial de Infraestruturas (SAA e SAR):

- Caracterização de desempenho do sistema
- Análise das vulnerabilidades do sistema
- Avaliação económica de infraestruturas
- Apoio ao sistema de GPI

1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O presente relatório é composto por cinco capítulos, nos quais se encontram descritos os conhecimentos apreendidos no decorrer do estágio curricular.

- **Capítulo 1 - Introdução:** Neste capítulo apresenta-se um enquadramento e objetivos do relatório, assim como uma breve descrição da empresa onde foi realizado o estágio.

- **Capítulo 2 - Revisão bibliográfica:** No capítulo dois são apresentados os resultados da revisão bibliográfica realizada, essencial para atingir os objetivos propostos.
- **Capítulo 3 - *Softwares* utilizados:** Neste capítulo são brevemente descritos os *softwares* utilizados na elaboração da ferramenta em estudo.
- **Capítulo 4 - Metodologia Aplicada:** No capítulo 4 descreve-se a metodologia aplicada para a análise da ferramenta, fazendo-se uma breve descrição desta, do exemplo utilizado e da aplicação dos Algoritmo Genético. São também descritas as análises de sensibilidade que foram realizadas para proceder à avaliação das competências da ferramenta em elaboração.
- **Capítulo 5 - Considerações Finais:** Neste capítulo são apresentadas as conclusões retiradas do estudo elaborado assim como sugestões de possíveis desenvolvimentos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO

Um sistema de abastecimento é constituído por um conjunto de elementos, com objetivos específicos, que, ligadas entre si, asseguram o transporte da água até às populações. É através destes órgãos que é feita a captação, tratamento e transporte da água entre as diferentes fases, até às populações de destino. É importante salientar que cada um destes órgãos é cuidadosamente dimensionado, tendo em consideração as funções para as quais são destinados.

Os principais elementos constituintes de um sistema de abastecimento em alta são: obras de captação, estações elevatórias, adutoras, ETA e reservatórios (Sousa, 2001).

2.1.1 Obras de captação:

Órgãos responsáveis pela captação da água bruta superficial ou subterrânea nas origens, tendo em conta as disponibilidades da mesma, assim como as necessidades das populações a abastecer.

Entende-se como captação de água superficial a extração de água de rios ou lagos, desde que possuam caudais em quantidade suficiente e em condições de captação regulares ao longo do tempo (Sousa, 2001).

A captação subterrânea recorre a águas que se encontram no solo e no subsolo, desde que se encontrem em quantidades consideradas aceitáveis para a captação. Esta água que se acumula em determinados locais, gera reservas que possibilitam a sua extração.

A captação superficial é a mais comum, uma vez que os volumes de água disponíveis são normalmente superiores embora apresente um nível de qualidade da água, na origem, inferior relativamente às águas subterrâneas. Como tal, às captações superficiais, surge normalmente associada a necessidade de recorrer a estações de tratamento da água.

Na Figura 2.1 são representados exemplos de captação superficial e subterrânea.



a) Exemplo de captação superficial (cm-peniche.pt, 2016)



b) Exemplo de captação subterrânea (saaesaogabriel.ms.gov.br, 2016)

Figura 2.1 – Ilustrações dos diferentes tipos de captação.

2.1.2 Estações elevatórias e sobrepessoras:

Órgão de elevação com a função de elevar volumes de água entre um ponto de cota mais baixa e um ponto de cota mais alta, quando a energia disponível no escoamento não é suficiente para conduzir o fluido até a um nível superior.

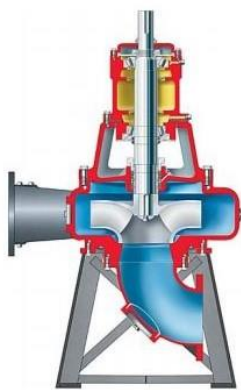
Classifica-se como estação elevatória sempre que a aspiração é efetuada a partir de um reservatório, enquanto que nos sistemas sobrepessores a aspiração é efetuada a partir da própria conduta. Na Figura 2.2 é representado o interior de uma estação elevatória.



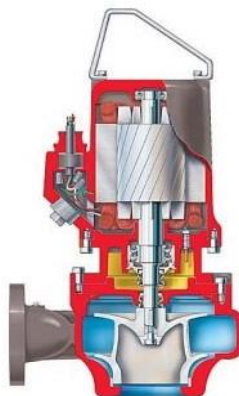
Figura 2.2 – Interior da Estação Elevatória de Alcanhões, Santarém. (adp.pt, 2016)

Os elementos responsáveis pela operação de bombagem, em estações elevatórias ou sobrepressoras são os grupos eletrobomba (motor + bomba). Uma bomba é uma máquina hidráulica capaz de elevar a pressão de um fluido, comunicando-lhe energia (Oliveira, 2015). Existem vários tipos de bombas distintos, conforme a sua aplicação ou pela forma como fornece energia ao fluido, sendo que as mais relevantes são as turbobombas ou bombas dinâmicas, das quais as bombas centrífugas são as mais utilizadas e conhecidas. O funcionamento destas bombas é simples: é aplicada uma força centrífuga ao fluido por uma roda ou propulsor, que se move dentro de uma caixa, orientando o fluido desde que entra no dispositivo até que sai, originando assim um aumento de pressão. A título de exemplo refira-se que as turbobombas são fundamentalmente de três tipos, conforme a direção de escoamento na saída da bomba (Figura 2.3):

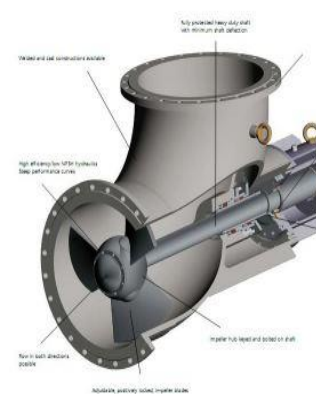
- Bombas centrífugas ou de escoamento radial
- Bombas de escoamento misto
- Bombas de escoamento axial



a) Bombas centrífugas ou de escoamento radial



b) Bombas de escoamento misto



c) Bombas de escoamento axial

Figura 2.3 – Vários tipos de turbobombas (Oliveira, 2015).

2.1.3 Adutoras, aquedutos e canais:

Órgão de transporte ou adução destinados a transportar a água entre várias etapas, desde a origem até à distribuição. O transporte pode ser em pressão, feito em tubagens, (quer por gravidade quer por bombagem) ou em superfície livre (canais ou aquedutos). As adutoras não possuem derivações e interligam o ponto de captação, estações de tratamento e reservatórios. Na Figura 2.4 é representado um exemplo de uma conduta adutora.



Figura 2.4 – Conduto adutora Pedrouços-Nogueira II. (Noraqua.pt, 2006)

2.1.4 Estações de tratamento de água (ETA):

Infraestrutura onde se transforma a água bruta em água potável, através de um processo de tratamento que poderá contar com várias etapas e que obedece às normas legais de qualidade da água. Após tratada, a água previamente extraída da origem, está própria para o consumo, podendo assim ser transportada até à população.

O processo de tratamento utiliza diversos processos físicos e químicos para que a água adquira propriedades que a tornem apropriada para o consumo.

Desse processo apresentam-se como exemplo algumas etapas (Richter, 2009; Vasconcelos, 2014)):

- Coagulação: aglomera as partículas finas que se encontram em suspensão com o objetivo de aumentar o seu volume para que se torne mais simples a remoção das mesmas. Recorre-se à adição de elementos como cal hidratada para este processo de aglomeração.
- Decantação: processo de separação das partículas que se encontram em suspensão na água que se depositam no fundo do decantador, por serem mais pesadas que a água. Neste processo as impurezas são reduzidas em grande parte.
- Filtração: distribuição da água por filtros que removem quase na totalidade as partículas que ainda se encontram em suspensão na água.
- Desinfeção: é efetuada uma desinfeção final da água, geralmente com cloro, a fim de garantir a qualidade bacteriológica da água.

Na Figura 2.5 é apresentada uma imagem da ETA de Tavira, no Algarve.



Figura 2.5 – Imagem do exterior da ETA de Tavira (aguasdoalgarve.pt, 2016).

2.1.5 Reservatórios:

Órgão de armazenamento que regula as flutuações por forma a equilibrar as necessidades de consumo com a adução. Também são dimensionados para constituírem reservas de emergência. Equilibram as pressões na rede de distribuição, assim como regularizam o funcionamento das bombagens. Existem três tipos de reservatórios, consoante a sua função:

- Distribuição: são reservatórios que alimentam diretamente as redes de distribuição, armazenando água quando o consumo é inferior à adução. Estes dispositivos garantem a homogeneização da qualidade da água ao mesmo tempo que asseguram a alimentação nas horas de ponta.
- Regularização: são reservatórios que se instalam na transição entre condutas adutoras (gravíticas ou elevatórias), equilibrando as pressões do sistema.
- Reserva: são reservatórios dimensionados para assegurar a reserva em situações de interrupções do fornecimento e também para utilizar em emergências como o combate a incêndios.



Figura 2.6 – Exemplo de reservatório (Águas do Norte, 2015).

2.2 OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

O potencial de otimização energética existente em sistemas de abastecimento de água surge da necessidade de reduzir os consumos de energia (em especial ao nível da elevação), aproveitando a capacidade de armazenamento existente nos reservatórios do sistema e procurando adequar os sistemas às reais necessidades. Como tal existem vários métodos de otimização energética que podem ser aplicados a sistemas de abastecimento com o objetivo de os tornar mais eficientes. Para a aplicação destes métodos é fundamental uma análise criteriosa ao sistema em causa, a fim de conhecer todas as suas características. Não obstante, importa, antes de mais, perceber quais os fatores que influenciam os consumos de energia, como os mesmos podem ser avaliados em termos de eficiência e quais os aspetos que podem ser alvo de otimização.

2.2.1 Conceitos base

Em relação aos sistemas elevatórios, para melhor compreensão dos principais fatores que influenciam o funcionamento dos grupos eletrobomba e, consequentemente, o seu consumo de energia, descrevem-se, em seguida, alguns conceitos relativamente às curvas características do sistema e da bomba, bem como em relação ao ponto de máxima eficiência (*Best Efficiency Point* – BEP).

- **Curva característica do sistema**

A curva característica do sistema (Figura 2.7) representa a relação entre o caudal e a altura manométrica necessária para elevar água, vencer as perdas de carga e manter as pressões necessárias a jusante ou atingir as cotas em reservatórios. Cada ponto da curva representa a soma

da altura geométrica com as perdas de carga (contínuas e localizadas), para um determinado caudal (Grundfos, 2005)

O ponto no qual a bomba vai funcionar é definido pela determinação da resistência que a bomba deve vencer. Esta resistência depende do caudal escoado, daí a importância da determinação da curva característica do sistema (Sousa 2001).

A curva característica do sistema é dada pela seguinte equação (2.1):

$$H = f(Q^2) \rightarrow H_{man} = H_{geo} + \sum J_i L_i + \sum k_t \frac{U^2}{2g} \quad (2.1)$$

onde:

H_{man} : Altura Manométrica (m);

H_{geo} : Altura Geométrica (m);

$\sum J_i L_i$: Perdas de carga contínuas;

$\sum k_t \frac{U^2}{2g}$: Perdas de carga localizadas

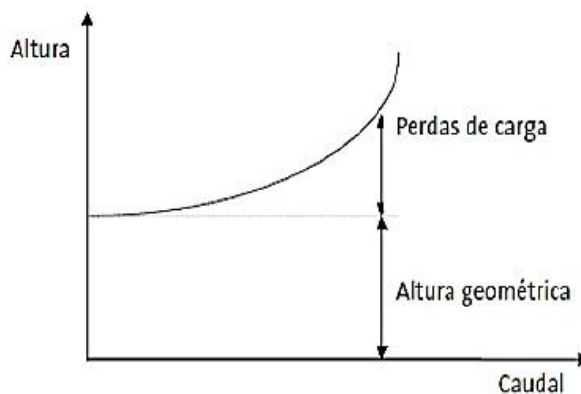


Figura 2.7 – Curva característica da instalação (Grundfos, 2005)

- **Curvas características da bomba**

Após serem definidos o caudal a bombear e a altura a elevar, é possível definir a bomba que melhor se adequa a estas condições do sistema a dimensionar. Esta seleção deve ter em conta a velocidade angular pretendida e, consultando um diagrama mosaico semelhante ao apresentado na Figura 2.8 seleccionar qual a bomba indicada, em função do caudal e da altura manométrica já definidos.

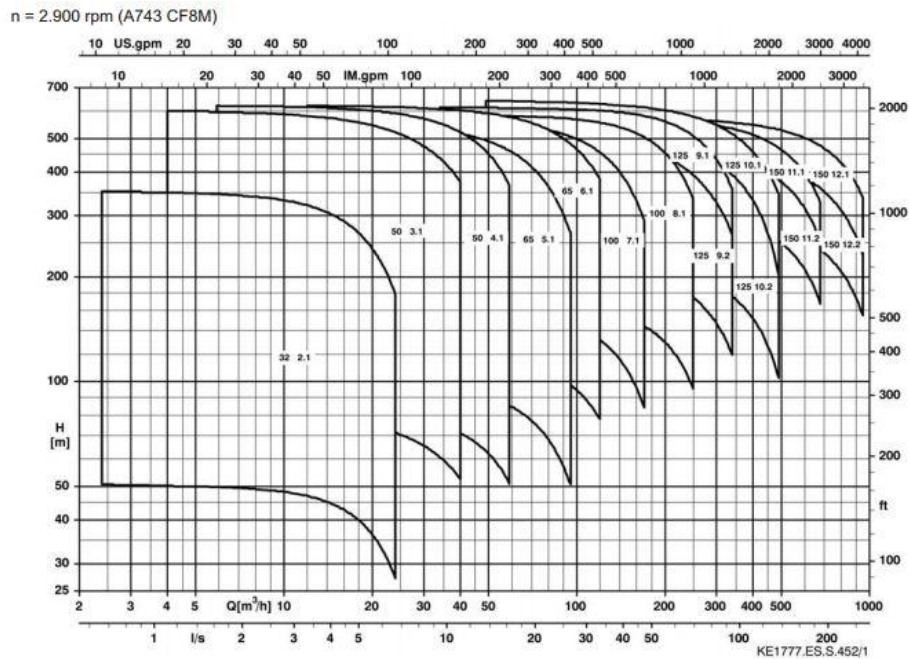


Figura 2.8 – Diagrama em mosaico para a seleção de bombas da marca Multitec, para a velocidade de rotação de 2900 rpm (KSB, 2016)

As curvas características da bomba incluem a relação entre altura de elevação e caudal (H/Q), para um determinado número de rotações do respetivo motor, também designada por curva de carga, a da variação de rendimento em função do caudal (η/Q) ou a potência em função do caudal (P/Q) (Rodrigues, 2016).

Os valores de altura de elevação (H) e caudal (Q), para o rendimento máximo definem a capacidade nominal do grupo eletrobomba. Dependendo do caudal, o valor do rendimento varia e difere sempre daquele rendimento máximo (Sousa 2001).

Na Figura 2.9 é ilustrado um exemplo da curva de carga definida anteriormente, assim como a representação do ponto de funcionamento que corresponde ao ponto de interseção desta curva com a curva característica do sistema. Os valores de potência e rendimento correspondentes a esse ponto de funcionamento poderão ser obtidos a partir das restantes curvas características da bomba, para o caudal elevado.

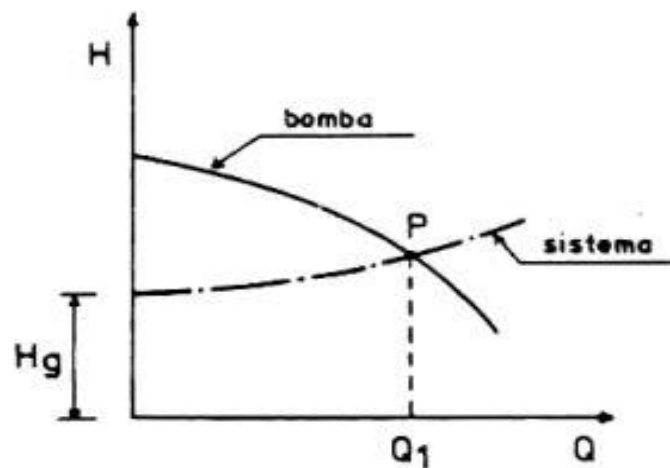


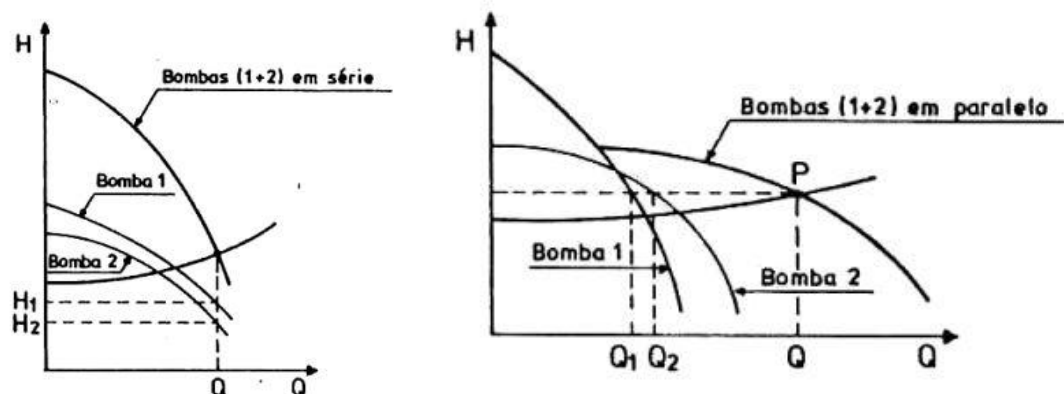
Figura 2.9 – Curva característica da bomba e curva da instalação e representação do ponto de funcionamento (Sousa, 2001)

As bombas podem também estar associadas em série ou em paralelo sendo, qualquer um destes casos, comum nos sistemas de abastecimento.

Uma instalação em série implica que a descarga de uma bomba coincide com a sucção da seguinte e a curva característica do conjunto é dada pela soma das ordenadas das curvas $H = f(Q)$ correspondentes, para cada bomba, a um mesmo caudal (Figura 2.10 a)), (Sousa 2001).

Duas ou mais bombas estão instaladas em paralelo quando ambas estão ligadas à mesma tubagem, na descarga, simultaneamente. A curva característica do conjunto obtém-se somando as abcissas das curvas características $H = f(Q)$ correspondentes, para cada bomba, a uma mesma altura total de elevação (Figura 2.10 b)), (Sousa 2001).

A instalação de bombas em paralelo permite que se utilize o método de escalonamento como solução de otimização. Trata-se de um sistema com múltiplos pontos de funcionamento o que possibilita uma maior versatilidade da operação, promovendo um sistema de funcionamento eventualmente mais próximo das necessidades reais do mesmo (Rodrigues, 2016). Este sistema permite também reduzir as perdas de carga do sistema uma vez que reduzindo-se o número de bombas em funcionamento simultâneo, será possível reduzir o caudal elevado (Leite, 2010). Esta solução tem, ainda, influência nos consumos de energia uma vez que promove a diminuição do número de arranques e paragens dos grupos elevatórios (Rodrigues, 2016).



a) Associação de bombas em serie

b) Associação em paralelo

Figura 2.10 - Associação de bombas e respetivas curvas características (DOE&HI, 2006)

- **Best Efficiency Point (BEP)**

Qualquer grupo eletrobomba tem um ponto de funcionamento ótimo que representa a eficiência máxima, quer a nível de consumos de energia, quer a nível de fiabilidade. Esse ponto é denominado por *Best Efficiency Point* (BEP) e por definição corresponde ao ponto de otimização das leis de conservação de energia do conjunto impulsor/voluta (Leite et al, 2011). Idealmente o sistema deverá operar nas proximidades deste BEP, no entanto o seu dimensionamento é focado essencialmente na necessidade da resposta satisfatória ao caudal máximo no ano horizonte do equipamento, levando a que os sistemas operam de forma ineficiente ao longo do período de vida útil do projeto (caudal superior ao necessário). Noutras situações poderá haver uma deslocação do ponto de funcionamento real relativamente ao BEP, por alteração dos níveis de perda de carga ou altura de elevação, face ao previsto, com um consequente decréscimo da eficiência energética do sistema. (Leite et al, 2011).

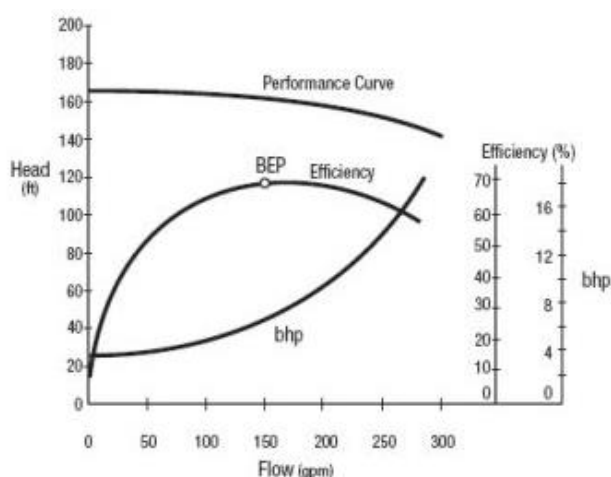


Figura 2.11 - Representação do BEP (DOE&HI, 2006)

2.2.2 Indicadores de eficiência energética

2.2.2.1 Energia Específica (E_s)

A energia específica, calculada em kWh/m³, é um indicador utilizado no cálculo do custo de bombagem de um determinado sistema que posteriormente é comparado com outras possíveis soluções de otimização de sistemas (HI&PSM, 2008). Pode ser calculada através da expressão(2.1):

$$E_s = \frac{\text{Energia consumida}}{\text{Volume bombeado}} \text{ [kWh/m}^3\text{]} \quad (2.2)$$

Em sistemas com apenas um ponto de funcionamento, o cálculo da energia específica é mais simples do que em sistemas com múltiplos pontos de funcionamento. Nestes casos, é necessário o cálculo ponderado da energia para cada ponto de funcionamento, por volume bombeado. (Vivas et al, 2014).

Não obstante, os sistemas deverão ser analisados atendendo ao desnível geométrico a vencer. Em casos em que este desnível é pouco significativo, a energia específica depende, essencialmente, das perdas de carga no sistema e, conseqüentemente, do caudal e da combinação do rendimento dos componentes (variador – motor elétrico – bomba). (Vivas et al, 2014). Neste tipo de sistemas a eficiência do grupo eletrobomba mantém-se praticamente inalterada com a alteração da frequência (Leite, et al, 2012).

$$E_s = \frac{H_{man} \times \rho \times g}{\eta_{variador} \times \eta_{motor} \times \eta_{bomba}} \text{ [kWh/m}^3\text{]} \quad (2.3)$$

No caso de sistemas com elevado desnível geométrico, este indicador apresenta algumas limitações uma vez que o cálculo da energia específica passa a contemplar também este componente o que faz aumentar o valor de energia especifica por unidade de volume. Todavia, uma vez que esta é uma característica do sistema, não é possível reduzi-la ou eliminá-la. No que diz respeito à análise comparativa de diversos sistemas, este indicador apresenta, assim, algumas falhas, no entanto apresenta algumas vantagens na análise de várias soluções de otimização para o mesmo sistema (Vivas et al, 2014).

2.2.2.2 Indicador ERSAR

Uma vez que o indicador da energia específica apresenta algumas limitações, a Entidade Reguladora dos Serviços de águas e Resíduos (ERSAR) considera indicadores de eficiência energética que servem, para além de colmatar a insuficiência apresentada no indicador anterior, para a avaliação da qualidade do serviço prestado pelas entidades gestoras /AA15E AR11) (Vivas et al, 2014). O indicador ERSAR pode ser traduzido pela seguinte expressão:

$$\text{Indicador ERSAR} = \frac{\text{Energia consumida}}{\text{Volume bombeado} \times \text{Altura manométrica}} \times 100 \text{ [kWh/m}^3 \cdot 100\text{m]} \quad (2.4)$$

Este indicador permite homogeneizar a parcela da altura manométrica, constituindo assim uma versão uniformizada da energia específica (Vivas, et al, 2014) e assim permitindo comparar sistemas elevatórios distintos, incorporando o rendimento do sistema.

$$\text{Indicador ERSAR} = \frac{\rho \times g}{\eta_{variador} \times \eta_{motor} \times \eta_{bomba}} \times 100 \text{ [kWh/m}^3 \cdot 100\text{m]} \quad (2.5)$$

A escala de classificação considerada pela ERSAR é diretamente relacionada com o rendimento global do sistema. No caso de sistemas de abastecimento cada valor do indicador tem um rendimento associado:

- Boa qualidade do serviço: valores entre 0.27 e 0.40 kWh/(m³.100m) correspondem valores de rendimento acima de cerca de 70%
- Qualidade mediana: valores entre 0.40 e 0.54 kWh/(m³.100m) correspondem valores de rendimento entre os 50% e os 70%
- Qualidade insatisfatória: valores acima de 0.54 kWh/(m³.100m) correspondem valores de rendimento inferiores a 50%

2.2.2.3 Green Pump Index (GPX)

Numa abordagem distinta, surge o indicador adimensional GPX:

$$GPX = \frac{Q \times H_{geo}}{3.67 \times Pot} \quad (2.6)$$

onde:

Q – caudal bombeado medido em m³/h

H_{geo} – o desnível geométrico a vencer em m

Pot – potencia elétrica consumida pelo grupo em kW

Este índice corresponde a uma estimativa de um rendimento equivalente do sistema mediante a elevação de um dado caudal para vencer um dado desnível geométrico. Uma vez que considera a altura geométrica em lugar da altura manométrica, descarta as ineficiências que são alvo de otimização, como as perdas de carga, assim como as ineficiências associadas ao rendimento dos equipamentos. Comparando com os indicadores descritos anteriormente, o GPX procura refletir a eficiência do equipamento nas especificidades do sistema, tornando mais fácil a comparação entre grupos eletrobomba diferentes, independentemente da sua aplicação (Vivas et al, 2014).

Este índice procura também comparar o desempenho real do equipamento com o desempenho atual do sistema. Na Figura 2.12 é apresentada esta comparação sendo “C” o estado atual e “P” o estado que se poderá potencialmente atingir. (Vivas et al, 2014).

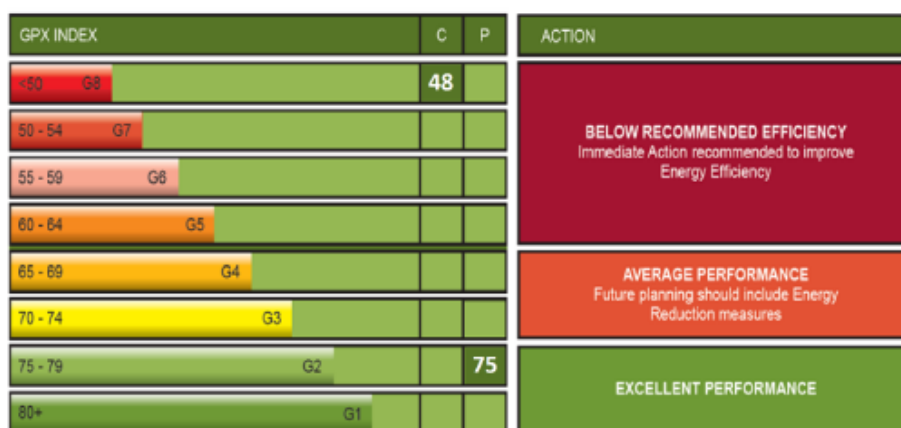


Figura 2.12 – Escala de classificação do índice GPX, de acordo com o funcionamento atual e o que poderá atingir (exemplo). (Vivas et al, 2014)

2.2.3 Fatores que influenciam a otimização

Para abordar a questão da otimização da operação de sistemas de abastecimento de água, pode ser feita uma análise ao nível do planeamento a longo prazo e da operação em tempo real, tendo ambas as questões como objetivo a determinação de estratégias operacionais otimizadas relativamente à operação dos componentes do sistema (reservatórios e bombas), tal como as variáveis que decidem o *status* de funcionamento destes elementos em determinado intervalo de tempo do horizonte do planeamento estratégico.

O planeamento a longo prazo tem como principal objetivo definir estratégias operacionais ótimas, como por exemplo, definir o nível de água inicial nos reservatórios, minimizando os consumos de energia ao longo do dia (Cunha, 2009). O planeamento a longo prazo constitui, assim, uma ferramenta de avaliação interessante, permitindo avaliar o comportamento dos níveis dos reservatórios no sentido de perceber se a sua utilização está a ser capaz de satisfazer as necessidades de jusante ou então se está a ser subutilizado.

Surgiu a necessidade de utilizar um modelo operacional em tempo real, com base em dados constantemente atualizados. Essa estratégia denominada operação em tempo real, transforma uma estratégia operacional estática numa estratégia operacional dinâmica (Cunha, 2009). Este planeamento estratégico proporciona à operação a capacidade de ajustar continuamente às situações que vão surgindo ao longo do intervalo de tempo em estudo, identificando novas possibilidades. No entanto, é necessário que a operação em tempo real se aproxime das respostas produzidas pelo modelo de planeamento a longo prazo. Esta tarefa torna-se complexa devido ao elevado número de elementos passível de ter o seu estado modificado a cada hora.

Partindo das abordagens mencionadas anteriormente e segundo Tsutiya (2001) o principal objetivo da gestão da operação de abastecimento de água é a programação do funcionamento dos sistemas elevatórios durante um determinado período de tempo, de modo a satisfazerem as necessidades e restrições do sistema, minimizando o custo operacional. Tendo em conta os vários métodos existentes para reduzir o custo operacional do sistema, apresentam-se, adaptado de Tsutiya (2001), metodologias que podem ser aplicadas, tendo em conta as características de cada sistema.

- **Redução do custo sem redução do consumo de energia elétrica, ou alterações operacionais:**

Sendo uma das medidas mais simples, é das ações mais utilizadas. São ações administrativas que não necessitam de investimento em novas instalações ou equipamentos. Consistem na alteração da estrutura tarifária, ou da potência contratada. Em alguns casos é possível o corte de uma ligação que não esteja a ser utilizada uma vez que mesmo desativada o consumo mínimo de baixa tensão é pago. Também é importante contabilizar o erro de leitura que, em qualquer caso, origina prejuízos. Outra medida também bastante utilizada é a redução do custo com recurso a pequenos investimentos em equipamentos e instalações, após a realização de estudos. Como exemplo desta medida enquadra-se a correção do fator de potência que, apesar de não influenciar diretamente a energia consumida, nos motores em que este fator é baixo as correntes são maiores o que origina um aumento das perdas na instalação. Uma medida igualmente eficaz é a alteração da tensão de alimentação (passagem de baixa para alta tensão) sendo que o consumo com alta tensão é geralmente mais económico do que com baixa tensão. No entanto esta alteração só se torna possível se for contruída uma entrada de energia elétrica para a alimentação em alta tensão. A melhoria do fator de carga que por definição é a relação entre a potência média solicitada pela instalação e a potência máxima ocorrida durante o determinado período de tempo, pode também ser uma medida eficaz para a redução dos custos.

- **Redução do custo pela diminuição do consumo de energia elétrica:** O custo de consumo de energia elétrica é o produto da energia consumida, pela tarifa correspondente ao período em que essa energia elétrica foi consumida. Focando na diminuição do consumo de energia é necessário proceder a alterações em algumas grandezas do sistema:

- i) Redução da altura manométrica: A nível da altura geométrica, muito dificilmente é possível obter uma diminuição da mesma sem que haja uma reformulação mais ou menos profunda do sistema. Relativamente às perdas de carga, dependem do coeficiente de atrito, do comprimento e do diâmetro da tubagem e da velocidade da água. Assim sendo, a sua redução passaria pela escolha adequada do diâmetro económico, pela limpeza ou revestimento da tubagem, eliminação de ar nas tubagens e pela correta escolha das tubagens na estação elevatória. Não obstante, as perdas de cargas estão relacionadas com o caudal, numa relação

de segundo grau. Por conseguinte, um sistema a funcionar acima das necessidades reais implica um consumo de energia desnecessário. Assim, um dos principais fatores para melhorar a eficiência de um sistema de abastecimento de água é a redução das perdas de carga através, por exemplo, da possibilidade de adaptar o caudal bombeado à variação do caudal afluente, alterado a altura de elevação e implicando assim uma redução no consumo de energia. Uma forma de redução da altura manométrica passa pela alteração do diâmetro do impulsor, sendo um processo que tem como objetivo uma redução da energia fornecida ao fluido pelo grupo eletrobomba, sem alterar as características do motor elétrico. A alteração do impulsor corresponderá a uma translação na curva pressão/caudal representativa do funcionamento do grupo (Leite et al, 2011). Na Figura 2.13 é demonstrado um exemplo desta translação, obtendo-se assim uma redução das perdas de carga assim como um funcionamento mais próximo das necessidades do sistema (DOE & H, 2006). Esta solução apenas será aplicável, todavia, a situações em que se verifica existir uma capacidade de elevação excessiva, uma vez que essa capacidade é alterada definitivamente por corte do impulsor.

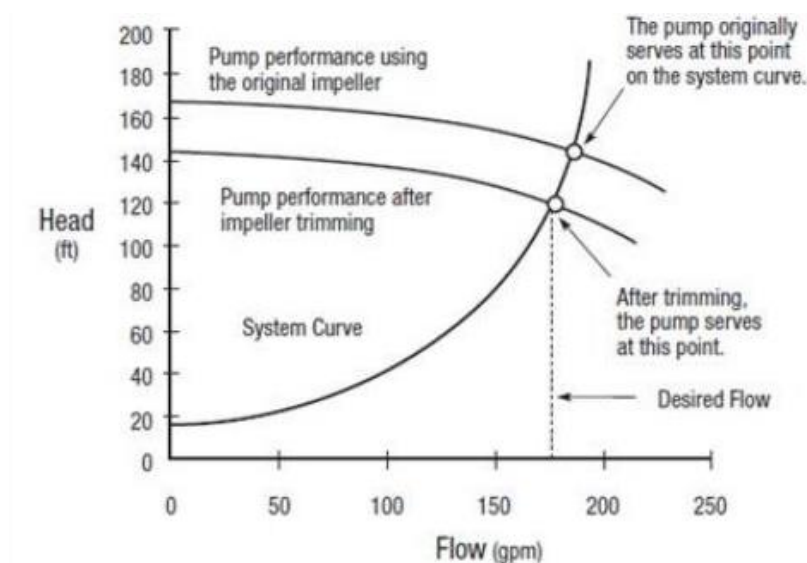


Figura 2.13 – Consequência da alteração do diâmetro do impulsor no ponto de funcionamento (DOE & HI, 2006)

Por outro lado, também é possível a instalação de dispositivos que controlem a velocidade de rotação da bomba, modificando o ponto de funcionamento do sistema através da alteração da tensão e da frequência fornecida pelo motor (CEATI, 2009). Estes dispositivos denominam-se variadores de velocidade e apresentam um funcionamento muito próximo do ideal em sistemas dominados pelas perdas de carga, uma vez que permitem a alteração do ponto de funcionamento, mantendo a eficiência mecânica elevada através do deslocamento do ponto de

funcionamento ao longo da curva característica da instalação, na direção das curvas de iso-eficiência, como é representado na Figura 2.14. Como tal, a introdução destes dispositivos no sistema, para além de facilitarem a adaptação do caudal bombeado às necessidades de funcionamento torna, ainda, possível reduzir as perdas de carga totais do sistema (Leite et al, 2010). As curvas de isoeeficiência são definidas através da ligação de pontos de igual eficiência em curvas para três ou mais velocidades de rotação (Europump, 2004).

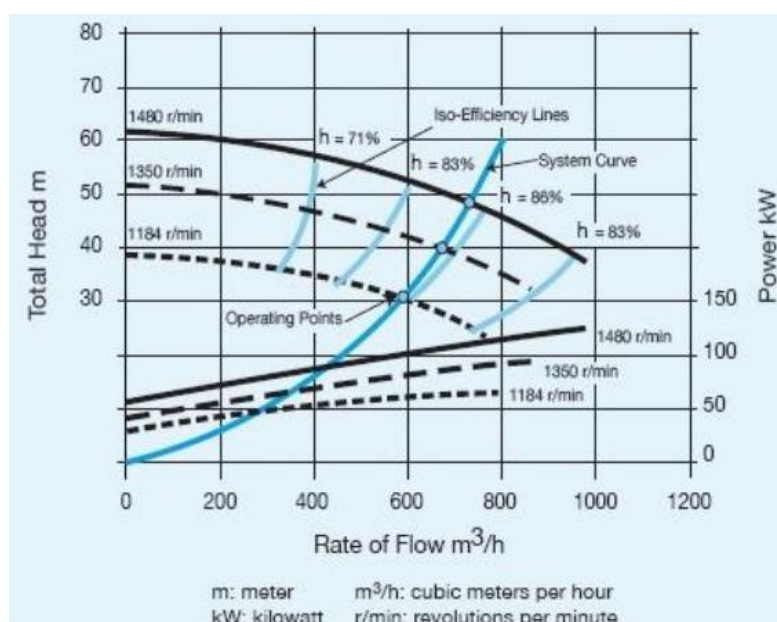


Figura 2.14 – Variação do ponto de funcionamento, segundo as curvas de iso-eficiência, com variador de velocidade (DOE et al,2004)

Ao optar por esta solução, é necessário ter em conta se o sistema é controlado pela perda de carga ou pelo desnível geométrico, sendo que, neste último caso, a instalação de variadores de velocidade e consequente alteração do ponto de funcionamento origina uma variação importante do rendimento do sistema uma vez que a diferença entre o declive da tangente à curva característica da instalação e o correspondente das tangentes às curvas de iso-eficiência dos equipamentos é muito significativa (Leite, 2012). Na Figura 2.15 são apresentados graficamente os efeitos dos variadores de velocidades nos grupos eletrobomba.

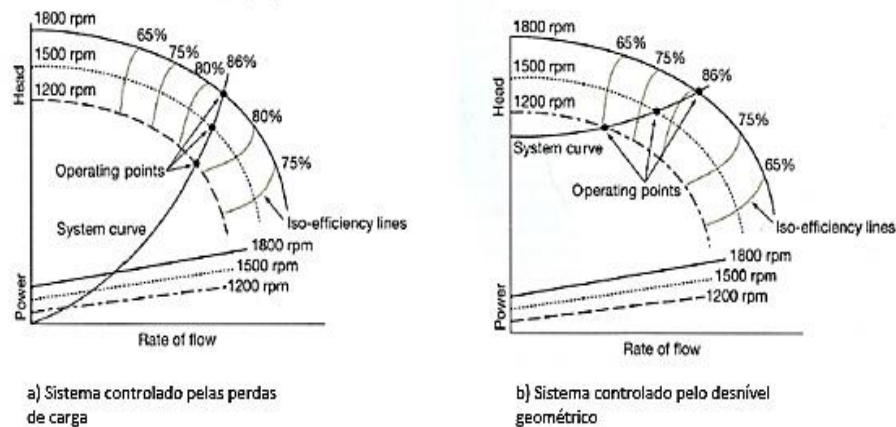


Figura 2.15 – Efeito dos variadores de velocidade nos grupos eletrobomba (Rodrigues, 2016).

- b) Redução do volume de água bombeada: esta medida implica uma redução de forma direta nos custos com energia elétrica uma vez que reduzindo o volume elevado, a energia consumida será consequentemente menor. Esta diminuição apenas é possível em situações que se conclua existir um desperdício de volumes a jusante que possam ser reduzidos ou eliminados, ou quando é possível alterar a forma de operação do sistema de modo a que os volumes a fornecer ao destino final sejam os mesmos (fornecidos por sistemas ou subsistemas alternativos), mas se reduza a necessidade de elevação.
- c) Aumento do rendimento do conjunto: os principais consumidores de energia elétrica do sistema são os motores e as bombas, pelo que se devem selecionar os grupos para os quais os pontos de funcionamento no sistema real resultem mais eficientes.
- **Redução do custo pela alteração do sistema operacional**: A operação de um sistema de abastecimento consiste numa sequência de ações exercidas sobre os seus elementos (como por exemplo válvulas e bombas), com o objetivo de satisfazer as necessidades do sistema, da forma mais eficiente possível. Esta operação pode ser realizada de formas distintas: controlo manual, controlo automático, controlo automático programado e controlo centralizado (Cunha, 2009). O controlo manual é efetuado por operadores locais que de forma empírica operam os elementos, tendo pouca informação sobre o restante sistema. No controlo automático, o sistema é controlado sem operador humano, sendo os componentes do sistema controlados por outros elementos (boias nos reservatórios, por exemplo). No controlo automático programado o sistema é controlado por Controladores Lógicos Programados. No controlo centralizado, a operação do sistema pode ser efetuado por operadores locais ou centrais. A operação é feita através de uma central de controlo que recebe os dados do sistema por telefone, radio ou telemetria, à qual os

operadores locais respondem (Cunha, 2009). Uma vez que a operação de um sistema de abastecimento é realizada de uma forma intuitiva, com base nos conhecimentos do sistema e em experiências anteriores, esta não tem por norma atenção ao modelo de otimização que é necessário para tornar o sistema mais eficiente, satisfazendo as necessidades do consumidor. Como tal, surge a necessidade de efetuar alterações no sistema operacional. Entende-se por alteração do sistema operacional a modificação da gestão do sistema, focando no funcionamento dos grupos eletrobomba, com o objetivo de otimizar os consumos de energia. Um sistema de abastecimento de água tem um funcionamento ótimo quando a sua operação garante a satisfação das necessidades dos consumidores, apresentando um custo total mínimo (Sousa et al, 2007). Os períodos de funcionamento dos sistemas elevatórios devem ser ajustados em função dos tarifários de energia em vigor, uma vez que estes variam ao longo do dia, tentando ao máximo que as bombas funcionem em períodos do dia em que o custo da energia seja mais baixo, tendo em conta a capacidade de reserva dos reservatórios e a flutuação dos consumos ao longo do dia. Assim sendo, e aproveitando a instalação de bombas em paralelo, por exemplo, é possível fazer um escalonamento do seu funcionamento, recorrendo a modelos matemáticos computacionais que permitam programar o número de arranques e paragens em função do nível de água nos reservatórios e do período do dia em causa. Neste caso, a programação deve ser efetuada de modo que aproxime os volumes efetivamente elevados aos indicados pelo modelo de controlo e simultaneamente minimize o número de arranques e paragens (Figueiredo e Martins, 2007).

2.2.4 Métodos matemáticos

Um método de otimização pode ser definido como um processo matemático que permite maximizar ou minimizar o valor de uma função, tendo em conta as diversas variáveis que influenciam o objetivo da função em questão.

Devido à complexidade em aplicar métodos de otimização a sistemas de abastecimento de água, vários investigadores desenvolveram diferentes métodos para que fosse possível dar resposta às principais condicionantes destes sistemas.

Seguidamente são enumerados alguns dos mais relevantes métodos de programação matemática que podem ser aplicados à otimização.

2.2.4.1 Programação linear

Esta técnica foi abordada por Jowitt e Germanopoulos (1992) que desenvolveram um método robusto e com tempo de resolução pouco demorado, sendo por isso apto a ser utilizado em tempo real. São problemas de otimização em que tanto a função objetivo como as restrições são lineares. É uma área

importante da otimização, sendo que foram desenvolvidos vários algoritmos como por exemplo o algoritmo *simplex*.

Teoricamente, as restrições lineares definem um poliedro convexo denominado *conjunto de pontos viáveis*. Sendo que a função objetivo é também linear, qualquer lugar ótimo é também um lugar ótimo global, o que implica que a solução ótima apenas pode estar localizada num dos pontos da fronteira do conjunto de pontos viáveis. Os problemas de programação linear podem ser ditos como inviáveis se não for possível encontrar a solução ótima. Para que isto não aconteça, as restrições impostas não se podem contradizer (ex. $x \geq 5$ e $x < 1$), caso contrario não há solução ótima uma vez que não é possível encontrar uma solução (MAYS, 1999).

Pode também dizer-se que um problema de programação linear é ilimitado, cada vez que o poliedro for ilimitado na direção da função objetivo. Como exemplo desta questão apresenta-se o seguinte problema:

Maximizar $f(x)$ sendo que:

$$F(x) = x_a + 5x_b \quad (2.7)$$

$$x_a \geq 0 \quad (2.8)$$

$$x_b \geq 0 \quad (2.9)$$

$$x_a + x_b \geq 15 \quad (2.10)$$

Neste caso não existe solução ótima uma vez que podem ser construídas infinitas soluções.

2.2.4.2 Programação Não Linear

Este método de programação é utilizado em problemas em que as variáveis ou funções de custo não variem linearmente.

Apesar de os métodos de programação não linear não serem muito utilizados em problemas de otimização de sistemas de abastecimento de água, estes permitem uma formulação matemática mais geral do que outros métodos, fornecendo uma fundamentação para a análise destes.

Uma das razões para que este método não seja muito utilizado deve-se ao facto de o processo de otimização ser habitualmente lento e exigir um tempo computacional longo, comparando com outros métodos.

2.2.4.3 Programação Dinâmica

É um método utilizado para a otimização de processos de decisão multi-estágios. Um processo de decisão multi-estágios é aquele que pode ser desdobrado segundo um certo número de etapas sequenciais.

Este método é bastante utilizado como método de otimização de sistemas de distribuição de água e esta preferência pode dever-se ao facto de os sistemas de água terem características não lineares e tendencialmente estatísticas, que podem ser traduzidas na formulação de problemas de programação dinâmica.

Um problema de programação dinâmica implica que cada estágio inclua uma tomada de decisão acerca das alternativas disponíveis na conclusão do mesmo, podendo ou não alterar o estado do processo, representando obrigatoriamente uma transição entre o estado corrente e o estado futuro do processo. Entende-se como estado a condição do processo dentro de cada estágio.

O objetivo do decisor no processo multi-estágios é encontrar a trajetória ótima em relação ao retorno obtido com as decisões.

Assim, a programação dinâmica baseia-se na decomposição do problema de otimização, para que este seja resolvido numa sequência de problemas mais simples, chegando à solução ótima através de uma via repetitiva (ZYL et al, 2004).

2.2.4.4 Algoritmo Genético

Os Algoritmos Genéticos (AG) foram desenvolvidos por Holland na década de 60, na Universidade de Michigan uma vez que se considerou necessário criar um método de programação menos restritivo, através de técnicas evolutivas baseadas nos métodos de seleção natural de Charles Darwin (ZYL et al, 2004).

Os AG são métodos de otimização que funcionam por procura inspirada nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos, como tal possuem vários termos provenientes da biologia tornando-se necessário conhecer o seu significado:

- Cromossoma ou genoma: representa um simples ponto no espaço de procura. Representam a estrutura de dados que codifica uma solução para o problema.
- Gene: é a representação de um elemento do vetor solução.
- Alelo: valores que o gene pode assumir
- Indivíduo: é um membro da população de cromossomas ao qual corresponde um valor de ajuste ou adaptação
- Genótipo: representa a informação contida no cromossoma

- Fenótipo: é um cromossoma codificado que representa o objeto contruído a partir das informações do genótipo
- Epistasia: interação entre genes do cromossoma
- Elitismo: transferência dos melhores cromossomas de uma geração para a outra, sem alterações.

O processo de otimização tem início com a geração de uma população inicial de soluções composta por n indivíduos que representam os pontos do domínio da função objetivo de forma codificada. Durante o processo de otimização, esta população é avaliada e cada solução recebe um valor denominado de aptidão (*fitness*). A geração da população deverá ser de distribuição uniforme para que assegure a diversidade entre os cromossomas da população inicial.

De seguida, para que seja criada uma nova solução, através do operador genético de seleção, dois cromossomas pais, da geração atual, são cruzados pelo operador genético cruzamento e em seguida modificados pelo operador mutação. Seguindo estes passos sucessivamente são criadas novas populações (cromossomas) mais aptas, uma vez que as menos qualificadas para o efeito vão sendo ultrapassadas pelo processo de otimização. O desempenho dos novos indivíduos vai sendo testado e é definido um critério de paragem, para que seja possível chegar à melhor solução possível.

Com a repetição deste processo pretende-se alcançar a solução ótima para o problema de otimização, sendo esta selecionar de entre a população gerada pelo algoritmo o melhor individuo que satisfaça as condições ideias definidas pela função objetivo. Este processo é ilustrado na Figura 2.16.

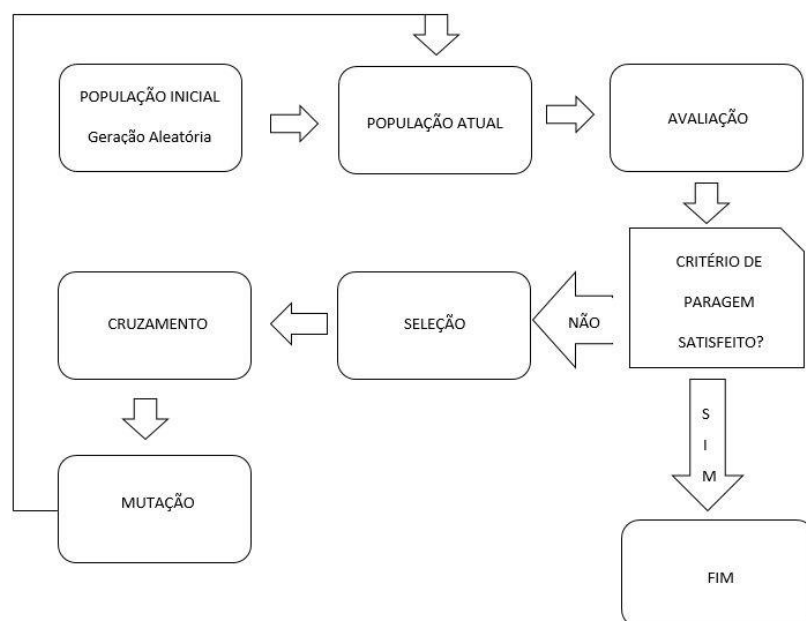


Figura 2.16 - Representação Sequencial do funcionamento do AG. (Adaptado de Cunha, 2009)

Relativamente à representação das soluções, estas são apresentadas numa cadeia (*string*) de características necessárias que esclarecem por completo a sua definição, constituindo as variáveis de decisão do problema de otimização.

Como já foi mencionado anteriormente, existem operadores genéticos que intervêm no processo de otimização de forma ativa na busca da solução ótima. Estes operadores são:

- **Operador Seleção:** num processo de otimização utilizando um algoritmo genético torna-se importante definir o processo de seleção dos indivíduos que construirão a nova geração. Assim devem ser selecionados os indivíduos mais aptos, para que a população vá melhorando ao longo das gerações. Não se aconselha que este mecanismo tenha um coeficiente de exigência muito elevado uma vez que se for feita uma seleção demasiado exigente a população passa a ser dominada muito rapidamente pelos indivíduos mais aptos, o que pode resultar numa estagnação num dos extremos locais e uma seleção pouco refinada, tornando o processo evolutivo mais lento.
- **Cruzamento:** é o processo de criação de novas soluções através do cruzamento entre as soluções atuais (indivíduos iniciais). Geralmente o cruzamento é feito através da permuta ou até da combinação de algumas características entre soluções pais.
- **Mutação:** é o processo que permite a inserção de novas características genéticas nas soluções já existentes, usando, eventualmente, uma substituição dos genes dos indivíduos. É normalmente realizada por representação binária ou por representação real, existindo assim a possibilidade de cada gene ser alterado apresentando uma pequena taxa de mutação.

2.2.5 Exemplos de aplicação de Métodos Matemáticos

Vários estudos foram desenvolvidos para otimização dos sistemas de distribuição de água, aplicando modelos matemáticos. Irão ser resumidos alguns destes estudos, focados na otimização em tempo real.

Nitivattananon et al (1996) aplicou um modelo de programação dinâmica para determinar o escalonamento das bombas, em tempo real, a um sistema de abastecimento complexo, conseguindo cerca de 20% de poupança relativamente ao custo operacional da época.

Cembrano et al (2000) foram uns dos primeiros a aplicar um modelo de controlo de otimização a uma rede na Europa, resultando em poupanças significativas nos gastos com energia.

Bunn and Wooley (2001) criaram um *software* para uma simulação de 24 horas de escalonamento de bombas em tempo real, vocacionado para a minimização do consumo de energia numa rede sob pressão, baseado em programação dinâmica e modelos lineares.

Zyl et al (2004) utilizaram um algoritmo híbrido genético para aplicar a um sistema de abastecimento de água com o objetivo de otimizar o sistema a nível dos consumos de energia. A eficiência da operação de otimização utilizando AG, em sistemas de distribuição foi melhorado ao desenvolver um método de otimização híbrido que combina AG com uma estratégia de pesquisa evolutiva. Este método procura um mínimo ou máximo, explorando a vizinhança da solução progressivamente, usando uma estratégia de pesquisa específica. Os métodos de pesquisa direta são caracterizados pelo facto de que apenas são usadas na pesquisa os valores das funções e não derivadas da função objetivo. O processo é repetido até que não sejam encontrados melhoramentos nos valores da função. O método híbrido apresenta algumas vantagens importantes, comparando com o AG simples, na convergência com as proximidades de uma solução global ótima, em termos de tempo e confiabilidade. Tal como indicado anteriormente, Zyl et al (2004) aponta que o grande potencial para reduzir o custo da operação pode ser a programação do funcionamento das bombas para minimizar os custos com a energia.

Jamieson et al (2007) e Rao e Salomons (2007) apresentaram um modelo quase ótimo da operação de bombas/válvulas para SAA, aplicado a um modelo de redes neuronais para substituir o modelo moroso de simulação hidráulica. O modelo foi aplicado a um pequeno e hipotético sistema.

Salomons et al (2007) e Martinez et al (2007) aplicaram modelos em algoritmo genético e redes neuronais que resultaram numa poupança de 25% e 17,6% respetivamente, quando comparado com a mesma operação em outros regimes. Entende-se por redes neuronais como modelos computacionais inspirados no sistema nervoso central animal, capazes de proceder de forma idêntica a uma máquina bem como reconhecer os mais diversos padrões.

Shamir e Saloms (2008) propuseram um modelo reduzido da rede completa, para diminuir o tempo de simulação enquanto mantem a alta precisão dos resultados da simulação. Eles afirmaram que o modelo pode correr de forma eficiente em tempo real para um sistema de larga escala, uma vez que seja reduzido o tamanho da rede de forma viável.

Pasha e Lansey (2009) desenvolveram um modelo operacional ótimo que utiliza as relações lineares entre a energia utilizada, os consumos e os níveis de água nos reservatórios. É confirmado que o modelo linear proposto pode reduzir o tempo computacional gasto, à custa de uma pequena quantidade de erros, podendo isto ser útil para operação em tempo real.

Pasha e Lansey (2010) propuseram duas abordagens com vista a reduzir o tempo computacional para operações em tempo real, uma usa os resultados dos referidos modelos lineares como uma solução inicial para o algoritmo evolucionário de pesquisa chamado Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA) enquanto que por outro lado usa Support Vector Machine (SVM) como modelo substituto de um sistema completo de equações, ligado com SFLA. Estas duas abordagens requerem um tempo computacional muito reduzido quando comparado com a abordagem convencional ligado SFLA com EPANET.

Jung et al (2014) sugeriram um modelo computacional para redução do custo com a operação, combinando Algoritmo Genético com e um simulador hidráulico (EPANET). Este modelo de controlo *on-line* de sistemas, em tempo real, responde proactivamente às variações de consumos a curto prazo e minimiza os custos de operação de bombagem. O modelo combina três modelos de simulações: previsão de consumos, análise hidráulica da rede e otimização do controlo do sistema. É aplicado a um sistema de dimensões médias localizado e Seoul, Coreia do Sul, e os resultados das simulações são comparados com o esquema da operação convencional.

3 SOFTWARES UTILIZADOS

A ferramenta que serve de base a este relatório está a ser desenvolvida utilizando a linguagem de programação *Python*, funcionando de forma interligada com dois *softwares* distintos, o *EPANET* como simulador hidráulico onde é definido o esquema da rede a estudar, assim como as suas características, e o *PyCharm* que pode ser encarado como um compilador e um interpretador da programação em *Python*. A ferramenta a desenvolver utiliza Algoritmos Genético para a realização do processo de otimização, daí a necessidade de interagir com a plataforma *PyCharm* e poder tirar partido dos seus benefícios ao nível da aplicação do Algoritmo Genético.

3.1 SIMULADOR HIDRÁULICO – EPANET

O EPANET é um simulador hidráulico, criado por Rossman (2000), que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e da qualidade da água de sistemas de distribuição para abastecimento (Cunha, 2009).

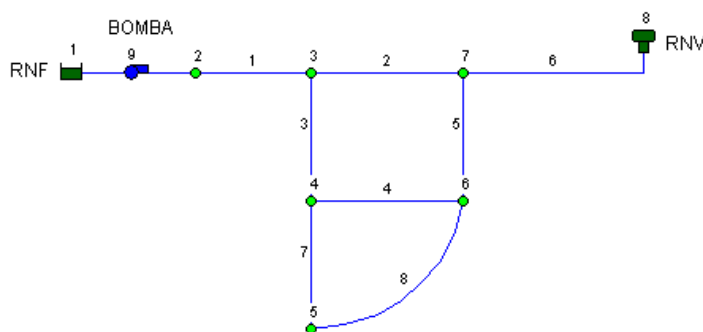


Figura 3.1 – Exemplo da representação de uma rede no EPANET (Manual do utilizador, 2002),

3.1.1 Descrição geral

O modelo EPANET é distribuído gratuitamente sob duas formas: executável e código fonte (*Toolkit Library*) que permite ao utilizador uma maior versatilidade na sua utilização. Relativamente à resolução das equações de continuidade e da conservação da energia, o modelo utiliza o Método do gradiente modificado, que assenta numa aproximação híbrida nó-malha para a resolução dessas equações.

Para uma utilização mais avançada recomenda-se a consulta do manual do utilizador do EPANET da autoria de U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) e traduzido para português pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Este simulador destaca-se pela sua versatilidade e simplicidade de uso, podendo adequar-se facilmente a várias situações relativamente a sistemas de abastecimento. As principais vantagens deste simulador são:

- Dimensão ilimitada da rede a analisar
- Possibilidade de escolha da fórmula de cálculo das perdas de carga (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning)
- Possibilidade de considerar perdas de cargas localizadas em curvas, alargamentos ou estreitamentos
- Modelação de bombas de velocidade constante ou variável
- Cálculo da energia de bombagem e do respetivo custo
- Modelação dos principais tipos de válvulas
- Conexão com códigos computacionais de diversas linguagens através da *toolkit*
- Reconhecido pela comunidade científica
- Distribuição gratuita e traduções para a língua inglesa, portuguesa e espanhola

A *toolkit* é uma biblioteca dinâmica (DLL) que contem funções que possibilitam a programação de forma a desenvolver aplicações específicas. Também permite abrir e fechar um arquivo que contenha a rede (ficheiro .inp), bem como ler e modificar o vários parâmetros de projeto e operação, simula períodos extensivos e obter os resultados passo a passo, escrevendo-os nos arquivos de saída (ficheiro .rpt). (Cunha, 2009).

3.1.2 Componentes físicos da rede

Uma rede é constituída por tubagens, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e ou reservatórios de nível variável. Na Figura 3.2 são representados os componentes físicos de um sistema de distribuição de água passíveis de serem representados no EPANET. Através do EPANET é possível conhecer os valores de caudal, pressão, energia e outros elementos fundamentais do sistema. Pode ser utilizado em diversas situações tais como estabelecimento de cenários de projeto, calibração de modelos hidráulicos, análise do decaimento do cloro residual e avaliação de consumos (Costa, 2009).

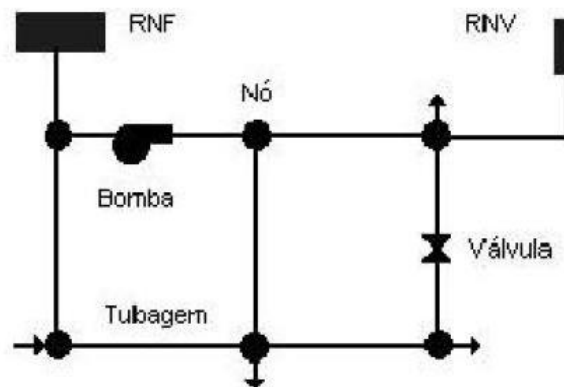


Figura 3.2 – Componentes físicos de um sistema de distribuição de água (LNEC, 2004)

- **Reservatórios:**

Nível fixo (RNF): No caso de se pretender simular lagos, rios ou ligações a outros sistemas, sendo possível obter um volume muito superior aos consumos da rede, poderá considerar-se que os mesmos possuem um volume ilimitado, com um armazenamento de água e carga hidráulica constante. O principal parâmetro a inserir nas propriedades do EPANET, nestes casos, é a cota do nível de água.

Nível variável (RNV): apresentam uma capacidade limitada de volume de água e o seu volume pode variar ao longo da simulação. Os principais parâmetros a definir no EPANET, nestes casos são diâmetro, cota do fundo, altura de água mínima, máxima e inicial. Refira-se que o EPANET apenas contempla a opção de reservatórios do tipo circular, pelo que, para simulação de reservatórios com outro formato de planta, deverá ser obtido o diâmetro equivalente, para a mesma área de implantação.

- **Tubagens:** elementos que transportam a água entre os vários pontos da rede. O EPANET considera que o escoamento é dado em pressão, dos pontos de cota mais elevada para os de cota mais baixa. Os principais parâmetros a caracterizar para cada trecho de tubagem são: diâmetro interior, nó inicial e final, comprimento, coeficiente de rugosidade e estado da tubagem no início da simulação (aberto, fechado ou com válvula de retenção). Após a simulação é possível obter as seguintes grandezas, referentes ao escoamento em cada trecho de tubagem: caudal, velocidade, perda de carga e fator de resistência.
- **Bombas:** elementos que transmitem energia para o sistema, aumentando a carga hidráulica. Os principais parâmetros a introduzir no sistema são: nó inicial e final e a curva característica da bomba. Também é possível associar, a cada bomba, uma curva de rendimento do grupo eletrobomba, assim como padrões temporais do custo da energia. O programa pode assim

determinar o consumo de energia e o respetivo custo da simulação. O EPANET devolve, ainda, para cada instante, o caudal bombeado e a respetiva altura de elevação.

- **Nós:** são elementos da rede em que as tubagens ligam entre si e onde a água entra e sai da rede. Os principais parâmetros a caraterizar são: cota topográfica e consumos associados. Os principais resultados passíveis de serem obtidos são: carga hidráulica total e pressão.
- **Válvulas:** elementos que limitam o caudal ou a pressão em determinados pontos da rede. Podem ser de vários tipos: válvula de controlo da pressão a jusante ou válvula redutora de pressão (VRP), válvula de controlo da pressão a montante ou válvula de alívio (VA), válvula de perda de carga fixa (VPCF) válvula reguladora de caudal (VRC). Os principais parâmetros a introduzir no sistema são: diâmetro, nó inicial e final, estado e parâmetro de controlo. O programa devolve o caudal e a perda de carga na válvula.

3.1.3 Componentes não físicos da rede

Os componentes não físicos da rede definem o comportamento e os aspetos operacionais de um sistema de distribuição de água (Costa, 2009).

- **Curvas:** As curvas representam uma relação entre duas grandezas, sendo que vários componentes podem apresentar a mesma curva. O EPANET permite definir os seguintes tipos de curvas:

Curva Característica da Bomba (CCB): tal como já foi descrito anteriormente, a curva característica da bomba representa a relação entre o caudal e a altura de elevação, sendo o caudal representado no eixo das abcissas e a altura de elevação, em metros, no eixo das ordenadas. O EPANET pode definir a CCB através de uma equação, de um conjunto de pontos com os respetivos valores de caudal elevado e altura manométrica correspondente ou apenas pelas características de caudal e altura de um ponto, correspondente ao ponto de funcionamento pretendido para da bomba.

Curva de Rendimento da Bomba: esta curva relaciona o rendimento do grupo que é representado em percentagem no eixo das ordenadas com o caudal. A definição desta curva é dispensável se o utilizador optar apenas por definir um valor global, fixo, nas opções de energia. Esta curva é utilizada apenas para cálculos energéticos.

Curva de Volume: Esta curva relaciona o volume de água disponível num reservatório, representado no eixo das ordenadas, com o a altura de água no mesmo. São utilizadas quando é necessário representar um RNV que possui uma secção que varia com a altura.

Curva de Perda de Carga: relacionam as perdas de carga numa válvula, por exemplo, representadas no eixo das ordenadas, com o caudal. Aplicam-se à modelação de situações com uma relação específica entre estes dois fatores.

- **Padrões Temporais:** são constituídos por um conjunto de valores que, multiplicados por uma grandeza, demonstram a variação da mesma ao longo de um determinado período de tempo. O utilizador define os valores a multiplicar, tendo em consideração que os padrões temporais apresentam um passo de tempo fixo (hora, por exemplo) passível de ser definido pelo utilizador. Como exemplos de possíveis utilizações dos padrões temporais refiram-se a representação da variação de consumos ao longo do dia e da alteração da tarifa de energia conforme a hora do dia.
- **Controlos:** são um conjunto de instruções de operação da rede, definidas pelo utilizador. Definem o estado dos troços da rede (válvulas, bombas ou tubagens), em função de condições do sistema, como por exemplo, a altura de água num RNV ou os valores de pressão em determinados pontos da rede. Existem dois tipos de controlos:

Controlos Simples: apenas alteram o estado ou as propriedades de um troço com base na altura de água no RNV, pressão em um determinado nó, instante do dia ou da simulação. Não existe limite para o número de controlos simples que podem ser utilizados.

Controlos com Condições Múltiplas: alteram o estado ou as propriedades de um troço com base em regras que resultam da combinação de um conjunto de fatores definidos pelo utilizador. Estas condições podem ocorrer após o cálculo das condições iniciais.

3.1.4 Simulações e Resultados

Como já foi mencionado anteriormente, no EPANET é possível realizar simulações de dois tipos distintos: estáticas (*single period*) ou dinâmicas (*extended period analysis*). Uma simulação estática permite reproduzir as características do sistema simulado num dado instante. Uma simulação dinâmica consiste na avaliação ao longo do tempo, através da associação de fatores temporais a certos componentes do sistema.

Os resultados da simulação podem ser visualizados de diversas maneiras. Numa simulação estática, é possível obter os vários valores do sistema, como por exemplo, valor de pressão no nós ou caudais nas tubagens, através de um esquema de cores que compõe a rede do sistema, como é apresentado na Figura 3.3.

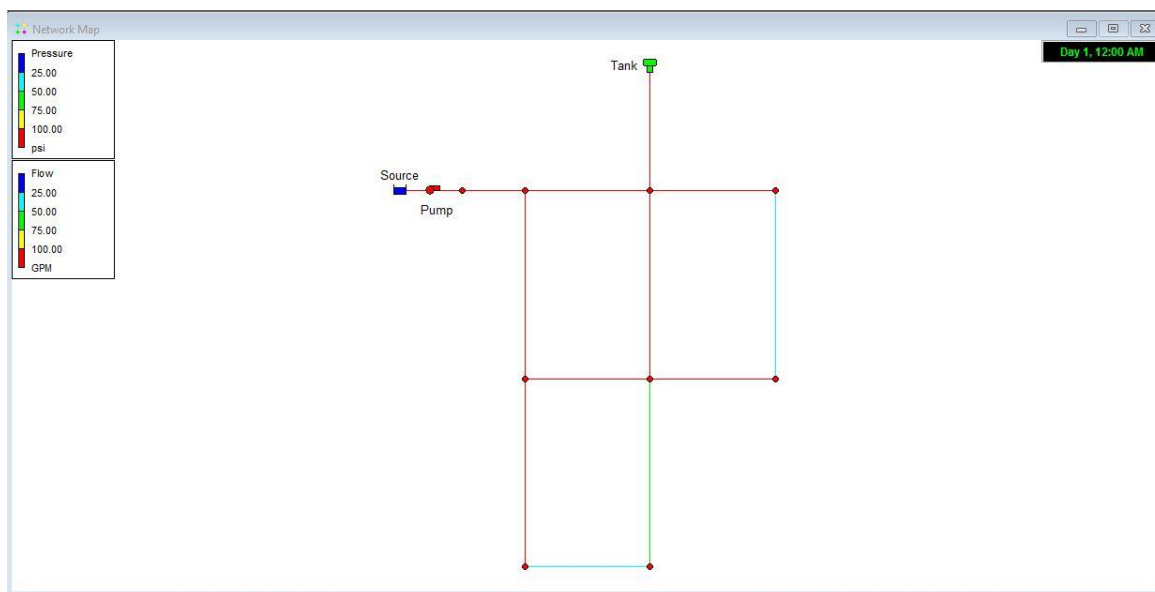


Figura 3.3 – Valores de pressão nos nós e caudal nas tubagens, através de um padrão de cores. Exemplo de uma rede. (EPANET examples, 2002).

Numa simulação dinâmica, é associado um padrão temporal, como por exemplo associar um padrão de consumos em um determinado nó ou então um padrão do custo da energia em uma determinada bomba. Após a simulação, é possível obter os resultados não só pelo padrão de cores mencionado anteriormente, mas também em gráficos ou tabelas, onde é possível verificar as variações dos valores ao longo do período de simulação. Na Figura 3.4 e Figura 3.5 são apresentados exemplos de um gráfico da pressão no reservatório e uma tabela que representa os parâmetros que variam numa determinada tubagem.

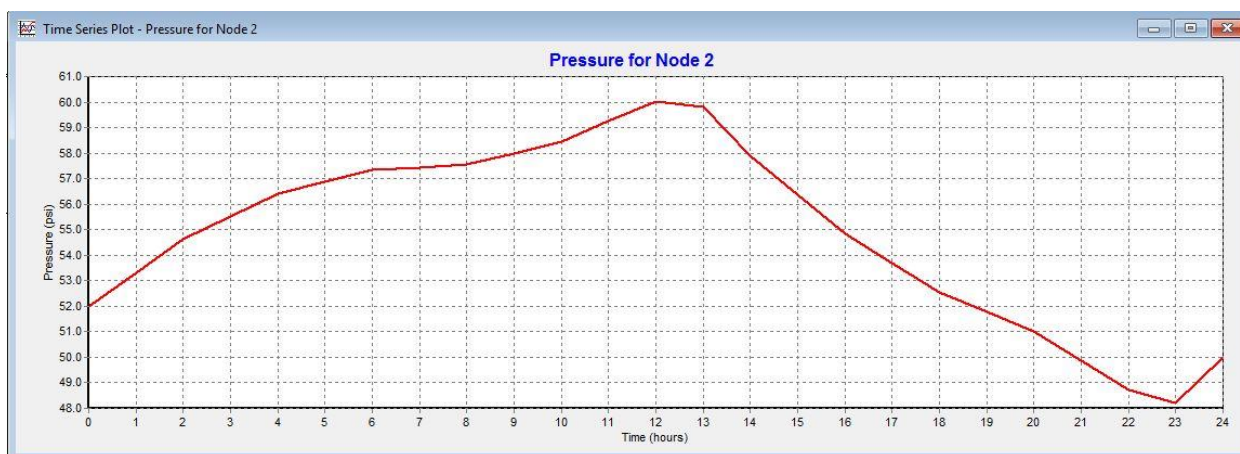
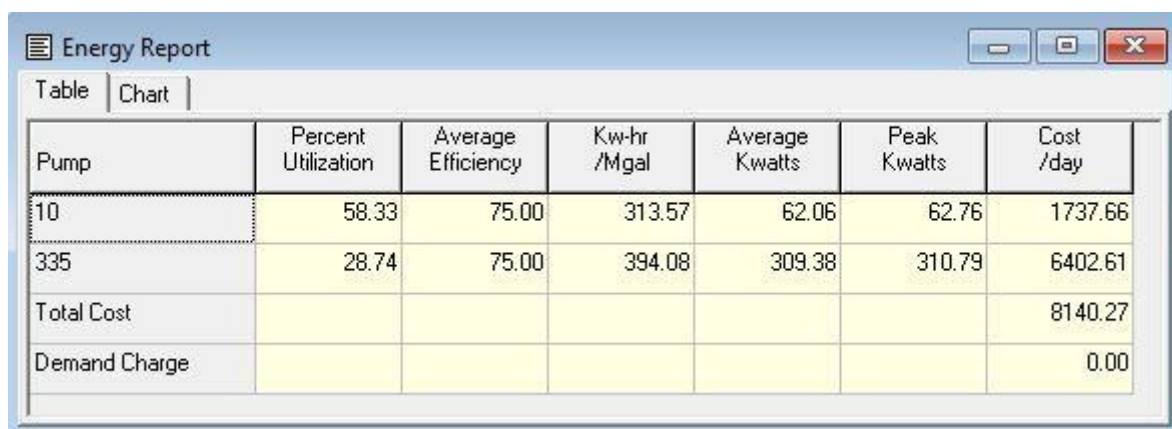


Figura 3.4 – Exemplo de um gráfico que ilustra os valores de pressão no reservatório, ao longo do período de simulação, (EPANET exemplo, 2000)

Time Hours	Flow GPM	Velocity fps	Unit Headloss ft/Kft	Friction Factor	Reaction Rate mg/L/d	Chlorine mg/L	Status
0:00	140.81	0.90	0.79	0.042	0.00	0.50	Open
1:00	140.46	0.90	0.78	0.042	2.13	0.41	Open
2:00	162.22	1.04	1.02	0.041	1.80	0.34	Open
3:00	162.05	1.03	1.02	0.041	2.79	0.55	Open
4:00	185.52	1.18	1.31	0.040	3.41	0.65	Open
5:00	185.46	1.18	1.31	0.040	3.54	0.66	Open
6:00	209.99	1.34	1.65	0.039	3.55	0.66	Open
7:00	209.98	1.34	1.65	0.039	3.67	0.67	Open
8:00	185.38	1.18	1.31	0.040	3.68	0.67	Open
9:00	185.33	1.18	1.31	0.040	3.56	0.66	Open
10:00	161.53	1.03	1.01	0.041	3.54	0.66	Open
11:00	161.38	1.03	1.01	0.041	3.41	0.64	Open
12:00	138.75	0.89	0.77	0.042	3.39	0.64	Open
13:00	128.67	0.82	0.67	0.042	3.16	0.62	Open
14:00	102.93	0.66	0.44	0.044	2.94	0.57	Open
15:00	102.93	0.66	0.44	0.044	2.49	0.51	Open
16:00	77.20	0.49	0.26	0.046	2.15	0.44	Open
17:00	77.20	0.49	0.26	0.046	1.71	0.37	Open
18:00	51.47	0.33	0.12	0.049	1.46	0.32	Open
19:00	51.47	0.33	0.12	0.049	1.14	0.28	Open
20:00	77.20	0.49	0.26	0.046	1.01	0.25	Open
21:00	77.20	0.49	0.26	0.046	1.05	0.23	Open
22:00	102.93	0.66	0.44	0.044	1.02	0.22	Open
23:00	122.74	0.78	0.61	0.043	1.17	0.23	Open

Figura 3.5 – Exemplo de uma tabela que ilustra os valores que variam ao longo da simulação, numa determinada tubagem (EPANET, exemplo, 2000)

Após a realização da simulação o EPANET pode também calcular a energia despendida ao longo da simulação, se for associado um padrão de custo, tal como mencionado anteriormente, ou se for adicionado apenas um valor multiplicativo se se verificar o caso de o custo da energia não variar ao longo do dia. Estes valores de energia são apresentados numa tabela, semelhante à apresentada na Figura 3.6.



Energy Report						
Table Chart						
Pump	Percent Utilization	Average Efficiency	Kw-hr /Mgal	Average Kwatts	Peak Kwatts	Cost /day
10	58.33	75.00	313.57	62.06	62.76	1737.66
335	28.74	75.00	394.08	309.38	310.79	6402.61
Total Cost						8140.27
Demand Charge						0.00

Figura 3.6 – Exemplo de tabela que reporta a energia despendida ao longo da simulação (EPANET exemplo, 2000)

3.2 PYCHARM

O *PyCharm* é uma ferramenta de ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), um editor de códigos em *Python* que possui características que proporcionam grande produtividade aos utilizadores. Esta ferramenta é produzida pela *JetBrains*, criadores de ferramentas inteligentes de desenvolvimento para melhoria da produtividade (prnewswire.com, 2014).

A linguagem *Python* possui um modelo de desenvolvimento comunitário, aberto e gerido pela organização sem fins lucrativos *Python Software Foundation*, o que torna esta ferramenta bastante apelativa ao uso por parte de qualquer tipo de utilizador.

O *PyCharm* proporciona ao utilizador, de uma forma mais simples, a utilização dos *packages* do *Python*, permitindo uma fácil instalação e desinstalação dos mesmos. Para a elaboração da ferramenta alvo de estudo neste relatório foi necessário instalar vários *packages* para facilitar a programação. Ao nível da otimização energética e do Algoritmo Genético utilizado para esta otimização, recorreu-se ao *package Pyevolve* para obter as ferramentas do Algoritmo necessárias para realizar o processo e otimização. O *Pyevolve* é uma estrutura em Algoritmo Genético, escrito em puro *Python*, cujos principais objetivos são:

- Fácil utilização de API (Interface de Programação de Aplicações)
- O utilizador consegue ver e interagir com a evolução, através de estatísticas e gráficos
- O utilizador pode, de uma forma expansiva, criar novas representações e alterar os operadores genéticos
- As características implementadas podem ser consideradas comuns como por exemplo os operadores de seleção
- Existem parâmetros e operadores que já estão definidos por defeito
- É uma ferramenta de código aberto

O *Pyevolve* é uma ferramenta chave para a aplicação do Algoritmo Genético através da linguagem de *Python*, o que o torna bastante popular entre os utilizadores, também devido à sua forma intuitiva de adaptar os vários operadores às necessidades e objetivos de cada utilizador.

4 METODOLOGIA APLICADA

O objetivo primordial do presente relatório é descrever os procedimentos tidos em conta, com base na ferramenta de otimização em desenvolvimento por parte da empresa que acolheu o estágio, participando no processo de elaboração, realizando testes, e sugerindo melhorias à medida que análise ia avançando.

Para o desenvolvimento da ferramenta em estudo, foi indispensável tomar conhecimento sobre a linguagem de programação utilizada, os *softwares* acima mencionados, assim como todos os outros elementos necessários para proceder à otimização. Seguidamente apresenta-se o procedimento adotado ao longo da análise efetuada:

1. De modo a explorar o simulador hidráulico *EPANET*, realizaram-se análises de sensibilidade utilizando um exemplo para ser alvo das simulações.
2. Implementou-se a DLL de ligação ao *EPANET* de modo a ajustá-la à linguagem de programação utilizada nesta ferramenta.
3. Estudou-se o Algoritmo Genético e a forma como este se podia adaptar a sistemas de abastecimento, através do *package Pyevolve*.
4. Analisou-se a ferramenta em desenvolvimento, sendo feito um processo de *debug* e ajuste das características ao exemplo em estudo.
5. Realizaram-se análises de sensibilidade para perceber quais os operadores genéticos mais apropriados para utilizar no processo de otimização, assim como conjugar os fatores que interferem diretamente com a otimização, de modo a obter uma solução o mais eficiente possível.

4.1 BREVE DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO

A ferramenta foi pensada para colmatar a necessidade de avaliar as características de funcionamento de qualquer sistema de abastecimento de água, no sentido de avaliar as alterações que podem ser feitas ao nível da operação, para reduzir os custos com energia das estações elevatórias. Como mencionado anteriormente, o código de programação utilizado possui uma ligação ao simulado hidráulico *EPANET*, que permite obter os componentes físicos da rede em estudo. Por sua vez, os elementos operacionais, tais como alturas de água nos reservatórios, consumos associados, duração de simulação e intervalo de

cálculo, etc. são definidos num ficheiro Excel que permite ao utilizador uma maior interatividade e um ajuste facilitado destas características (Figura 4.1), mediante a simulação que é pretendida. A ferramenta importa os dados deste ficheiro e elabora a simulação com base nestes, eliminando quaisquer valores que possam estar previamente definidos no EPANET. É também neste ficheiro Excel que é definido o sistema a estudar, através do nome do ficheiro, no formato inp, tendo sido este definido com o *EPANET*. Na Figura 4.1 é ilustrado um exemplo deste ficheiro, onde é possível observar outros elementos que são importados a partir deste.

1	[File]		
2			
3	Local	C:\Users\W10\Desktop\3_OEp_\	
4	Inp file	EXEMPLO1_rev01.inp	
5	Net file	EXEMPLO1.net	
6	Rpt file	EXEMPLO1.rpt	
7			
8	[TIMES]		
9			
10	Duration (hh:mm)	24:00	
11	Hydraulic Timestep (hh:mm)	00:15	
12	Pattern Timestep (hh:mm)	01:00	
13	Inicial Time (hh:mm)	00:00	
14	Inicial Date (dd/mm/aaaa)	05/09/2016	

[TANKS]			
	Id	InitLevel	MinLevel
	2	4,5	3
			MaxLevel
			6

Figura 4.1 – Exemplo do Ficheiro de importação de dados

No caso da simulação de um sistema elevatório, o algoritmo genético irá definir um vetor com valores de 0 e 1 definindo o estado *on* ou *off* do sistema elevatório. Esse vetor será constituído por tantos valores quantos os intervalos de cálculo considerados e do resultado desse esquema de funcionamento será feita uma avaliação do custo total de operação. Poderá, então, dizer-se que cada vetor, i.e. cenário de operação do sistema, corresponde a um indivíduo da população, e que serão esses cenários os alvos da evolução genética pelo algoritmo, partindo de um número de indivíduos da população previamente definido e considerando, igualmente, um dado número de gerações, uma taxa de “*crossover*”, ou cruzamento, e uma taxa de mutação.

Tendo em conta as dimensões do reservatório e o tempo de funcionamento da bomba, o problema de otimização depara-se com uma situação de volumes variáveis entre simulações. A variação de volumes está associada a uma variação da energia e, logo a uma variação do custo, podendo uma simulação ser melhor do que outra simplesmente porque a bomba funcionou menos tempo e não porque seja efetivamente a melhor solução. Para colmatar essa diferença a ferramenta avalia o resultado final com base na função de custo específico, que divide o custo da energia, dependendo do tarifário em vigor, pelo

volume. A minimização desse valor será a função objetivo do algoritmo genético e os resultados desse custo específico corresponderão ao “Score” de cada indivíduo ou cenário de operação.

Considerou-se também que a percentagem de energia gasta associada ao arranque do grupo teria de ser tida em conta, uma vez que esta agrava ainda mais os custos associados ao funcionamento do grupo. Para tal, considerou-se que cada vez que o grupo eletrobomba arrancasse, correspondia a um consumo de energia equivalente ao funcionamento do grupo à potência máxima um determinado período de tempo, no caso 5 minutos.

Após uma análise geral do funcionamento da ferramenta, optou-se por penalizar as soluções em que os níveis máximos e mínimos de água nos reservatórios não fossem respeitados, atribuindo-lhe um valor de score elevado para o desenvolvimento do algoritmo.

À medida que o algoritmo corre, vão sendo atribuídos valores mediante os operadores genéticos e analisado o custo específico em função do funcionamento do grupo. No final da simulação é apresentada a melhor solução, com o custo específico mais baixo, sendo este o principal objetivo da ferramenta.

4.2 EXEMPLO UTILIZADO

Para a avaliação da ferramenta em estudo, utilizou-se um modelo simples, composto por uma conduta elevatória e um reservatório. Optou-se por um exemplo menos complexo para que fosse possível uma melhor perceção das funcionalidades e resultados da ferramenta de otimização.

A Figura 4.2 representa, no *EPANET*, o modelo em causa.

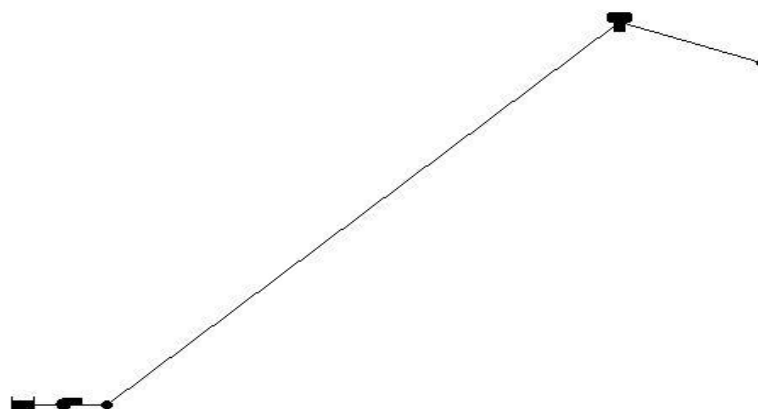
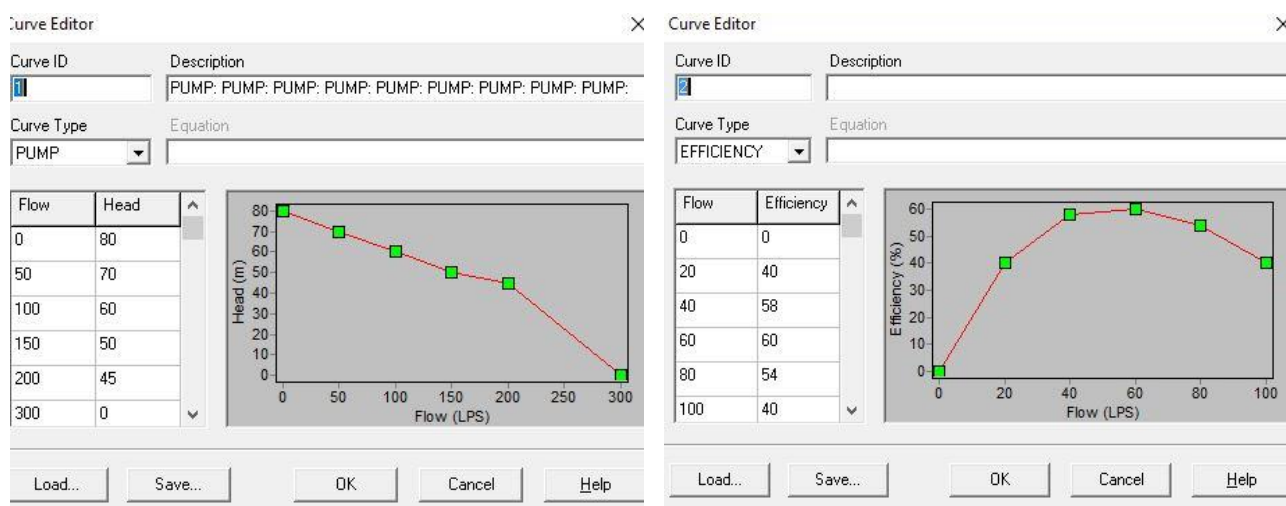


Figura 4.2 – Representação do exemplo utilizado

4.2.1 Componentes gerais do sistema:

- Reservatório de origem de nível Fixo
- Conduto elevatória com diâmetro de 200 mm e 1000m de extensão?
- Reservatório de nível variável com diâmetro de 15 m, nível máximo, nível mínimo, nível inicial
- Grupo eletrobomba com as seguintes características:

Curvas caraterísticas do grupo representadas em da bomba representadas na Figura 4.3.



a) Curva de carga bomba representada no EPANET b) Curva de eficiência bomba representada no EPANET

Figura 4.3 - Curvas caraterísticas do grupo

4.2.2 Tarifas de energia aplicadas

Para a ferramenta que serviu de base ao presente relatório, foram utilizadas as tarifas de energia apresentadas na Tabela 4.1, divididas em dois horários distintos: horário de Verão e horário de Inverno. Cada um destes horários é por sua vez dividido em dias uteis, sábados e domingos e feriados. Ao longo do dia os valores da tarifa vão variando, existindo quatro períodos distintos, hora de ponta, hora de cheia, hora de vazio, hora de super vazio. Na Tabela 4.1 é apresentada a distribuição diária do tarifário de energia elétrica, assim como os respetivos preços, em €/kWh.

Tabela 4.1 – Tarifas de energia

Período de hora legal de Inverno			Período de hora legal de Verão		
Custo (€/kWh)			Custo (€/kWh)		
De segunda-feira a sexta-feira			De segunda-feira a sexta-feira		
PONTA	09.30/12.00h 18.30/21.00h	0.0939	PONTA	09.15/12.15h	0.0939
CHEIA	07.00/09.30h 12.00/18.30h 21.00/24.00h	0.0843	CHEIA	07.00/09.15h 12.15/24.00h	0.0834
VAZIO NORMAL	00.00/02.00h 06.00/07.00h	0.0645	VAZIO NORMAL	00.00/02.00h 06.00/07.00h	0.0645
SUPER VAZIO	02.00/06.00h	0.0543	SUPER VAZIO	02.00/06.00h	0.0543
Sábado			Sábado		
CHEIA	09.30/13.00h 18.30/22.00h	0.0843	CHEIA	09.00/14.00h 20.00/22.00	0.0843
VAZIO NORMAL	00.00/02.00h 06.00/09.30h 13.00/18.30h 22.00/24.00h	0.0645	VAZIO NORMAL	00.00h/02.00h 06.00/09.00h 14.00/20.00h 22.00/24.00h	0.0645
SUPER VAZIO	02.00/06.00h	0.0534	SUPER VAZIO	02.00/06.00h	0.0543
Domingo e feriados			Domingo e feriados		
VAZIO NORMAL	00.00/02.00h 06.00/24.00h	0.0645	VAZIO NORMAL	00.00/02.00h 06.00/24.00h	0.0645
SUPER VAZIO	02.00/06.00h	0.0543	SUPER VAZIO	02.00/06.00h	0.0543

4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE UTILIZANDO O *EPANET*

No âmbito deste relatório, tornou-se necessário elaborar uma análise de sensibilidade tendo por base um exemplo de sistema de abastecimento. Esta análise permitiu conhecer o *software EPANET* assim como perceber quais os fatores que influenciam diretamente a energia gasta no sistema e consequentemente o custo global.

Inicialmente foram introduzidas algumas regras de funcionamento do sistema, regras essas que condicionam o seu funcionamento. No que diz respeito ao funcionamento da bomba, este controlou-se por regras que obrigam a que a bomba funcione condicionada aos níveis existentes no reservatório de

jusante. Assim, com o intuito de respeitar a altura de água mínima e máxima estabelecidas, impôs-se que quando o reservatório atingisse a altura máxima, a bomba desligava, verificando-se a situação contrária quando atingida a altura mínima. A simulação teve uma duração de 10 dias para que houvesse uma estabilização no ciclo de variação dos níveis de água nos reservatórios, ao longo da simulação.

Considerou-se relevante perceber qual a influência das bombas no decréscimo do custo com energia do sistema. Para tal resolveu-se alterar os valores de altura mínima no reservatório para que a bomba ligue. Esta situação permitiu que se alterasse duas variáveis: a altura inicial nos reservatórios e o nível mínimo de altura de água nos reservatórios para que as bombas liguem. Como resultado das várias combinações destas duas variáveis, conclui-se que o mais vantajoso a nível do consumo de energia seria uma opção em que a bomba ligue quando é atingida uma altura de água no reservatório aproximadamente igual à altura inicial.

Foi também testado o facto de forçar a bomba a desligar nos períodos do dia em que o tarifário de energia é mais dispendioso. Esta análise permitiu concluir que é necessário um controlo rigoroso entre o funcionamento da bomba e os tarifários ao longo do dia, tentando que a bomba funcione o mais possível nos períodos do dia mais económicos em detrimento das horas mais caras, definição essa que poderá ser conseguida com recurso a um método de otimização, como a ferramenta explorada no presente trabalho.

Com as várias análises que foram realizadas, adquiriu-se um conhecimento sobre o funcionamento do *software* EPANET, assim como das suas potencialidades para representação e interpretação de resultados de sistemas de abastecimento.

4.4 LIGAÇÃO DINÂMICA DO *PYTHON* À BIBLIOTECA DE FUNÇÕES DO *EPANET*

O *software* EPANET é acompanhado por um *toolkit* de programação constituído por um conjunto de funções integradas numa DLL (*Dynamic Link Library*), que são normalmente utilizadas para o desenvolvimento de outras aplicações.

No caso da ferramenta de otimização em estudo, com recurso ao “Manual de Sintaxe para EPANET *“link”* ao interpretador *MATLAB*”, elaborado por André Vieira (Vieira, 2003), foram testadas algumas funções essenciais para fazer a ligação entre o simulador hidráulico e a ferramenta. Uma vez que este manual foi desenvolvido para o *software* MATLAB, certa linguagem que constava no manual teve de ser traduzida para linguagem Python, para que fosse possível adaptar ao caso em estudo.

De todas as funções, destacam-se as seguintes:

- **ENopen:** abre o *toolkit* para analisar um sistema de distribuição em específico
- **ENclose:** fecha o *toolkit*, incluindo os ficheiros em processamento

- **ENgetnodevalue/ENgetlinkvalue:** devolve o valor de um parâmetro específico de um nó ou *link*
- **ENgetcount:** devolve o número de componentes de um tipo específico da rede
- **ENgetflowunits:** devolve um código indicativo das unidades utilizadas para expressar o caudal
- **ENsetcontrol:** estabelece os parâmetros de uma regra de controlo simples
- **ENsetnodevalue/ ENsetlinkvalue:** estabelece o valor de um determinado parâmetro de um nó ou *link*
- **ENSolveH:** corre uma simulação hidráulica completa com resultados para todos os períodos de tempo, escrito no ficheiro hidráulico binário
- **ENopenH:** abre o sistema hidráulico a ser analisado
- **ENinitH:** inicializar o armazenamento dos níveis nos tanques, estado e configuração e o instante de tempo anterior a correr a análise hidráulica
- **ENrunH:** corre um período de análise hidráulica, devolvendo o instante de tempo atual da simulação
- **ENnextH:** determina a duração até ao próximo evento hidráulico ocorrer, num período de simulação prolongado
- **ENcloseH:** fecha a análise hidráulica do sistema, libertando toda a memória alocada

4.4.1 Exemplo de Aplicação

Para aplicar as várias funções de ligação, foram elaborados vários exemplos de rotinas de programação, com o objetivo de avaliar o funcionamento das mesmas assim como perceber quais as potencialidades possíveis de desenvolver.

Recorrendo ao exemplo apresentado abaixo, foi elaborado um código de programação que permitisse fazer algumas alterações no sistema e observar os resultados dessas alterações. Na utilização deste código é possível obter as características bases da rede em estudo e proceder a uma alteração do diâmetro da tubagem a montante do reservatório. Antes de proceder à alteração, é também calculado o valor de pressão (nível de água) no reservatório, com o objetivo de o comparar com o valor após a alteração.

Escolheu-se apresentar no presente relatório o referido código por ser de fácil compreensão e por representar algumas das funções de ligação fundamentais. Seguidamente é apresentada a rotina elaborada:

```
from epanettools import epanet2 as et
# Abrir o ficheiro exemplo
```

```

ret= et.ENopen("EXEMPLO1_rev01.inp", "EXEMPLO1_rev01.rpt", "")

# Escrever característica gerais do sistema

ret,int_nnodes = et.ENgetcount(et.EN_NODECOUNT)
print("Network has",int_nnodes,"nodes.")

ret,int_ntank = et.ENgetcount(et.EN_TANKCOUNT)
print("Network has",int_ntank,"reservoirs and tank nodes.")

ret,int_nlinks = et.ENgetcount(et.EN_LINKCOUNT)
print("Network has",int_nlinks,"links.")

ret,int_npatcount = et.ENgetcount(et.EN_PATCOUNT)
print("Network has",int_npatcount,"time patterns.")

ret,int_ncurves = et.ENgetcount(et.EN_CURVECOUNT)
print("Network has",int_ncurves,"curves.")

ret,int_ncontrol= et.ENgetcount(et.EN_CONTROLCOUNT)
print("Network has",int_ncontrol,"simple control.")

# Obter o diametro num determinado link

diametro=et.ENgetlinkvalue(2,0)
print ("valor de diametro do link index 2", diametro[1])

#Obter o valor de pressao no reservatorio

pressao = []
time = []
int_tempo =0

et.ENopenH()
et.ENinitH(0)

while True:

    ret, x = et.ENrunH()
    time.append(x)

    ret, w = et.ENgetnodevalue(4, 11)
    pressao.append(w)

    ret, tstep = et.ENnextH()

    if (tstep <= 0):
        break

    ret = et.ENcloseH()

print ("valor de pressao no reservatorio", w)

#Alterar o valor de diametro para 400

novo_diametro=et.ENsetlinkvalue(2,0,400)
novo_inp=et.ENsaveinpfile("EXEMPLO1_rev02")

et.ENclose

# Abrir o novo ficheiro exemplo

```

```

ret= et.ENopen("EXEMPLO1_rev02.inp","EXEMPLO1_rev02.rpt","")

# Obter o diametro num determinado link

diametro=et.ENgetlinkvalue(2,0)
print ("valor de diametro do link index 2", diametro[1])

# Obter o valor da pressao no reservatorio, apos a alteracao

pressao = []
time = []
int_tempo =0

et.ENopenH()
et.ENinitH(0)

while True:

    ret, x = et.ENrunH()
    time.append(x)

    ret, w = et.ENgetnodevalue(4, 11)
    pressao.append(w)

    ret, tstep = et.ENnextH()

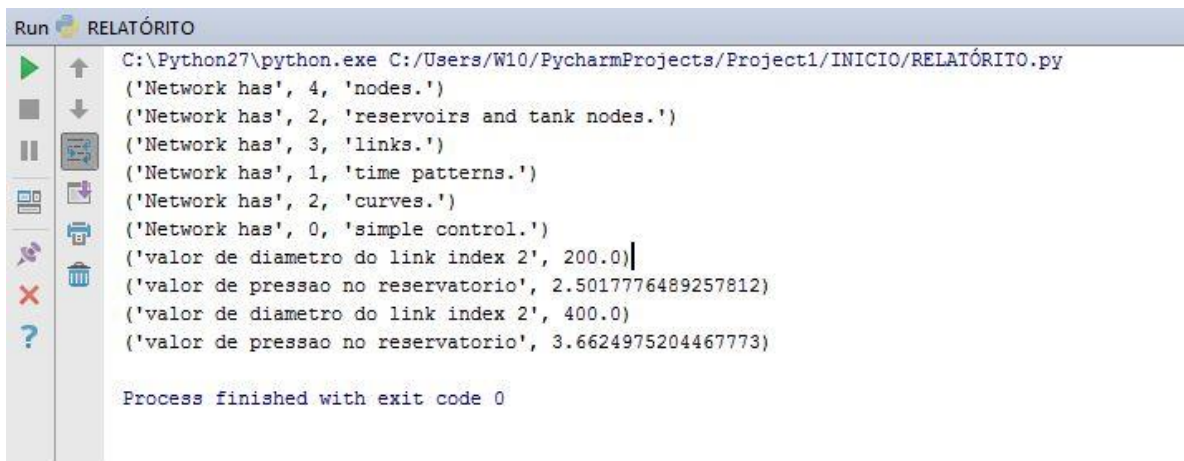
    if (tstep <= 0):
        break

    ret = et.ENcloseH()

et.ENsaveH()
print ("valor de pressao no reservatorio",w)

```

Correndo esta rotina, obtém-se os resultados apresentados na Figura 4.4.



```

Run RELATÓRIO
C:\Python27\python.exe C:/Users/W10/PycharmProjects/Project1/INICIO/RELATÓRIO.py
('Network has', 4, 'nodes.')
('Network has', 2, 'reservoirs and tank nodes.')
('Network has', 3, 'links.')
('Network has', 1, 'time patterns.')
('Network has', 2, 'curves.')
('Network has', 0, 'simple control.')
('valor de diametro do link index 2', 200.0)
('valor de pressao no reservatorio', 2.5017776489257812)
('valor de diametro do link index 2', 400.0)
('valor de pressao no reservatorio', 3.6624975204467773)
Process finished with exit code 0

```

Figura 4.4 – Resultados da rotina de análise das funções de ligação.

Como é possível observar ao correr o código, após o diâmetro da tubagem a montante do reservatório aumentar consideravelmente, o nível no reservatório também aumenta o que pode ser explicado devido ao facto de que um aumento do diâmetro na tubagem estar associado a um aumento de caudal e a uma

diminuição da perda de carga contínua, consequente aumento do volume de água que entra no reservatório.

Estas alterações são puramente experimentais, não tendo como objetivo explorar a vertente teórica do funcionamento do sistema, mas sim as potencialidades das funções de ligação ao simulador hidráulico.

4.5 PYEVOLVE

Tendo por base a ferramenta em estudo, foram realizadas várias análises de sensibilidade com o objetivo de apurar as potencialidades do *Pyevolve*, a nível da sua aplicação dos Algoritmos Genéticos. Como já foi mencionado anteriormente, o *Pyevolve* é um package integrante da plataforma *PyCharm*, que implementa o Algoritmo Genético, através de operadores definidos. Estes operadores podem se adequar a cada caso, sendo, portanto, pertinente analisar cada variante de cada operador, a fim de perceber qual a que melhor se aplica na situação em estudo.

4.5.1 Operadores Genéticos

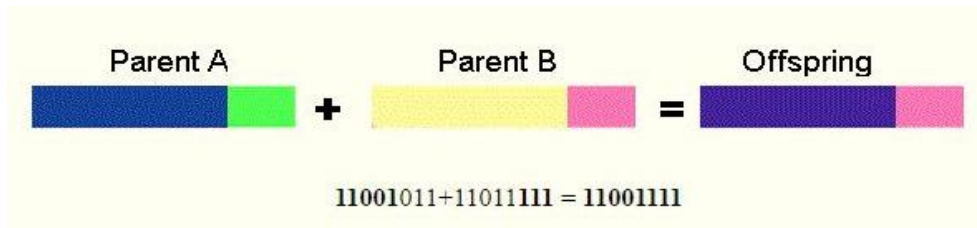
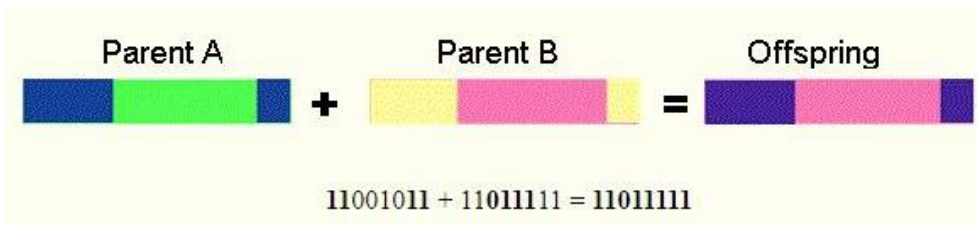
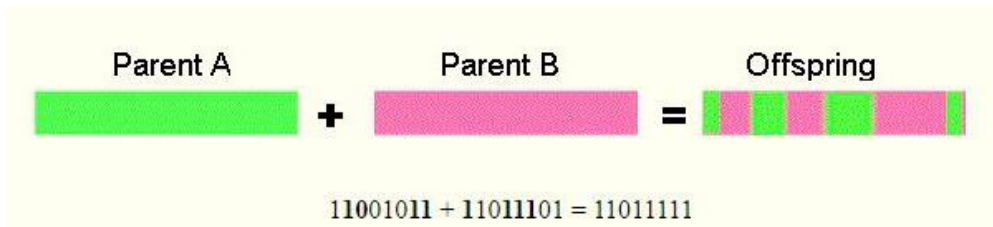
O *Pyevolve* inclui a clássica representação dos Algoritmos Genéticos (1D Binary String and 2D Binary String), assim como outras representações (1D List, 2D List, and Trees). Uma vez que o cromossoma de avaliação é uma lista de apenas uma dimensão (valores de 0 e 1), apenas vão ser apresentados rotinas de operadores correspondentes listas com uma dimensão (1D). (pyevolve.sourceforge.net, 2016 e Obitko, 1998)

- **Initializers:** O *Pyevolve* fornece rotinas de inicialização incorporadas:
 - a) *G1DBinaryStringInitializer*: Inicialização através de uma serie binária.
 - b) *G1DListInitializerAllele*: Inicialização através de um alelo definido no parâmetro genoma.
 - c) *G1DListInitializerInteger*: Inicialização através de números inteiros compreendidos entre valor mínimo e máximo definido pelo utilizador (facultativo).
 - d) *G1DListInitializerReal*: inicialização através de números reais compreendidos entre valor mínimo e máximo definido pelo utilizador (facultativo).
- **Selector:** O *Pyevolve* fornece rotinas de seleção incorporadas. Estas rotinas servem à seleção dos indivíduos de uma população que irão servir de base à criação da geração seguinte:
 - a) *GRankSelector*: Avalia a população e cada cromossoma recebe um valor (fitness) correspondente a esta avaliação. Ao pior será atribuído o valor 1, ao segundo pior o valor

2 e assim sucessivamente até ao melhor ter o valor N, sendo N o número total de cromossomas.

- b) *GRouletteWheel*: os progenitores são escolhidos de acordo com a sua aptidão (fitness). Quanto melhor for o cromossoma, mais hipóteses tem de ser selecionado. Imaginando uma roleta onde são colocados todos os cromossomas da população, cada um tem o seu lugar muito de acordo com a sua aptidão. Fazendo girar a roleta, o cromossoma com maior aptidão será selecionado mais vezes.
 - c) *GTournamentSelector*: é retirada uma amostra de N série da população de forma aleatória e uniforme. A melhor série é copiada para a geração seguinte e a operação é repetida até que a nova geração esteja preenchida.
 - d) *GUniformSelector*: a seleção é feita de uma forma aleatória e uniforme.
- **Crossover**: O *Pyevolve* fornece rotinas de cruzamento incorporadas:
 - a) *G1DBinaryStringXSinglePoint*: é selecionado um ponto de cruzamento, as trocas são realizadas copiando até esse ponto do primeiro progenitor, sendo o restante copiado do segundo progenitor.
 - b) *G1DBinaryStringXTwoPoint*: são selecionados dois pontos de cruzamento, as trocas são efetuadas copiando até ao primeiro ponto do primeiro progenitor, desse ponto até ao segundo ponto é copiado do segundo progenitor e o restante é copiado do primeiro progenitor.
 - c) *G1DBinaryStringXUniform*: os valores são copiados de forma aleatória a partir do primeiro ou do segundo progenitor, de forma a obter uma distribuição uniforme.

Na Figura 4.5 é apresentado um esquema ilustrativo de cada uma destas rotinas de cruzamento.

a) *G1DBinaryStringXSinglePoint*b) *G1DBinaryStringXTwoPoint*c) *G1DBinaryStringXUniform*Figura 4.5 - Rotinas de cruzamento (*crossover*) (Obitko, 1998)

- **Mutators:** O Pyevolve fornece rotinas de mutação incorporadas:
 - a) *G1DBinaryStringMutatorFlip*: este operador inverte o valor do cromossoma escolhido (se for 0 passa a 1)
 - b) *G1DBinaryStringMutatorSwap*: este operador troca o valor do cromossoma por outro valor existente na população de base.
 - c) *G1DListMutatorAllele*: o critério de mutação é definido por um alelo definido no parâmetro genoma
 - d) *G1DListMutatorIntegerBinary*: este operador altera os valores de 0 e 1 aleatoriamente
 - e) *G1DListMutatorIntegerGaussian*: este operador funciona através de uma distribuição de Gaussian. Vai atribuindo valores aleatórios e se estes valores estiverem de fora dos limites estabelecidos pelo utilizador são excluídos e um novo valor é selecionado.
 - f) *G1DListMutatorIntegerRange*: este operador seleciona valores de uma lista de números reais, com um valor máximo e mínimo.

g) *G1DListMutatorSwap*: este operador troca os valores de uma determinada lista.

Podem também ser definidos critérios de paragem que, uma vez atingidos, o algoritmo termina a evolução:

4.5.2 Análise de Sensibilidade

Para perceber quais os operadores genéticos mais apropriados para o exemplo em estudo, foi realizada uma análise de sensibilidade, alterando vários elementos cruciais para proceder a uma simulação. Para tal, considerou-se que alguns parâmetros iam ser fixos para todas as análises. Estes parâmetros estão definidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros a considerar em todas as análises

Duração da simulação (hh:mm)		24:00
Intervalo de cálculo (hh:mm)		00:15
Tempo de início (hh:mm)		00:00
Data Inicial (dd/mm/aaaa)		05/09/2016
Níveis de água no reservatório (m)		
Nível inicial	Nível Mínimo	Nível Máximo
4,5	3	6

Antes de iniciar a análise de cada operador, é importante perceber quais os operadores que estão seleccionados por defeito no Algoritmo, uma vez que esta análise é realizada procedendo à alteração de cada operador individualmente. Esses operadores, são:

- **Selector** – *GrankSelector*
- **Mutator** - *.G1DBinaryStringMutatorFlip*
- **Initializer** - *.G1DBinaryStringInitializer*
- **Crossover** - *.G1DBinaryStringXSinglePoint*

4.5.2.1 População e Geração

Primeiramente surgiu a necessidade de perceber qual a dimensão da população inicial, assim como qual o número de gerações necessárias para que o Algoritmo conseguisse devolver uma solução aceitável e vantajosa. Optou-se por fazer várias simulações fixando o número inicial de indivíduos da população em 80 e ir aumentando o número de gerações. Apesar de o tempo computacional dispensado nestas análises ser bastante reduzido, os resultados não se apresentaram os mais vantajosos, na medida em que, analisando o funcionamento do grupo eletrobomba e os níveis no reservatório, estes não satisfazem os requisitos de um funcionamento eficiente. Da Figura 4.6 até Figura 4.11 é possível observar gráficos do

caudal da bomba em função do tempo e os respetivos gráficos de nível de água no reservatório também em função do tempo, para simulações de, respetivamente, 40, 50 e 80 gerações.

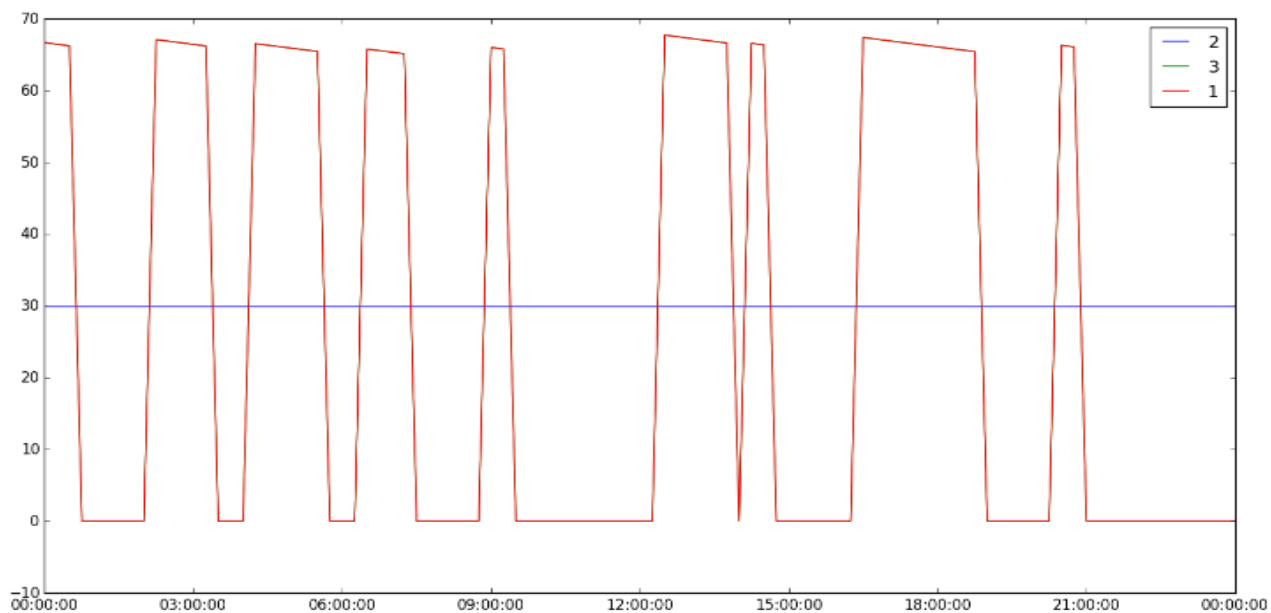


Figura 4.6 – Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 40 gerações.

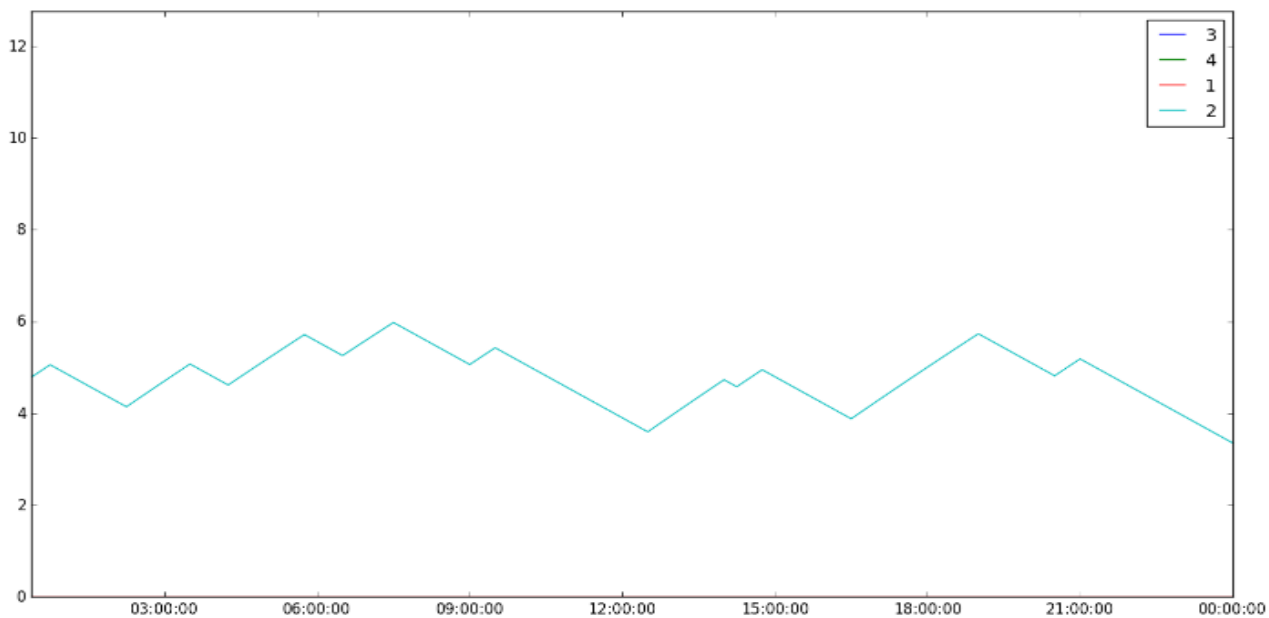


Figura 4.7 – Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 40 gerações.

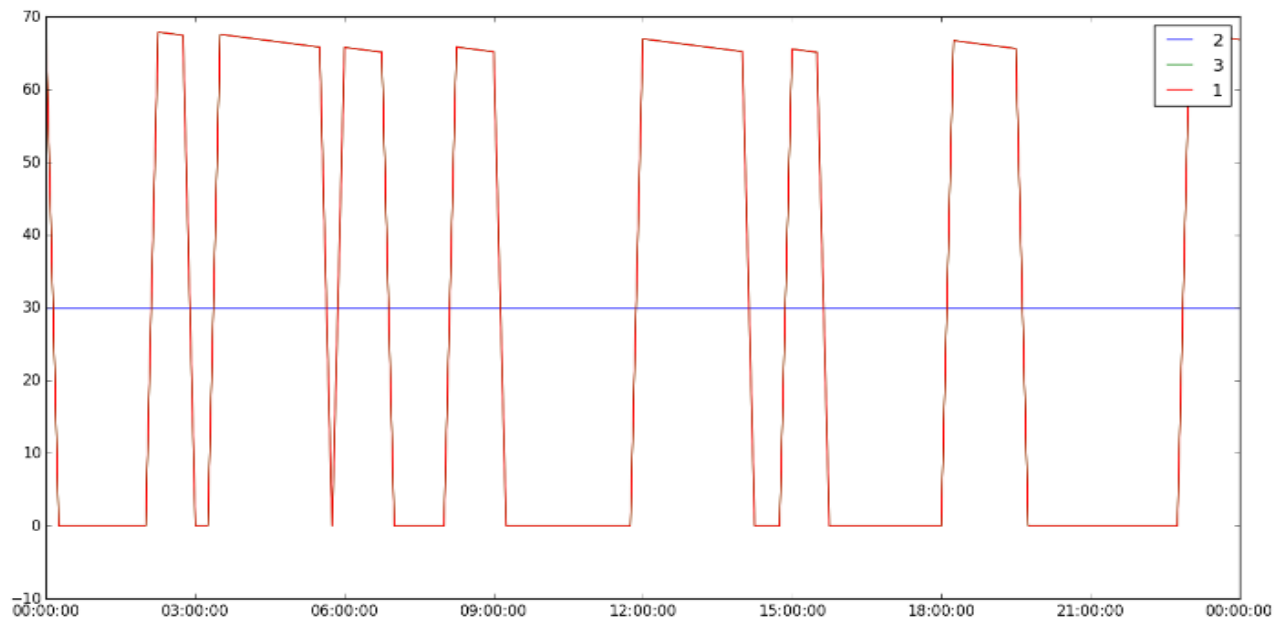


Figura 4.8 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 50 gerações.

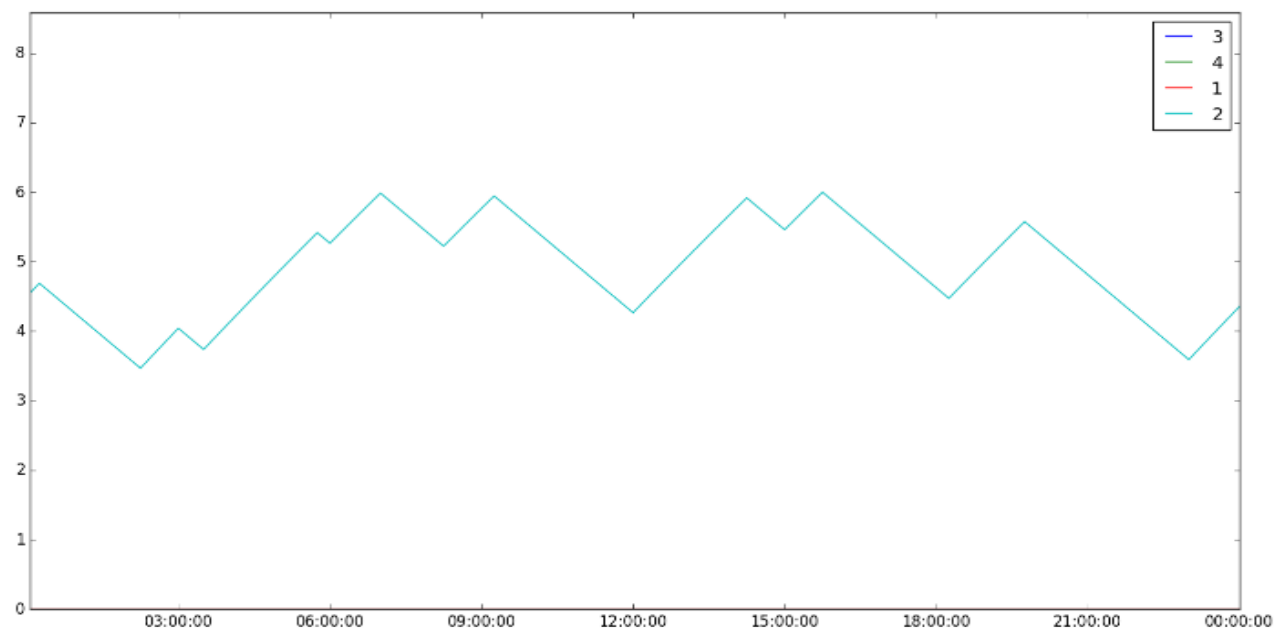


Figura 4.9 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 50 gerações.

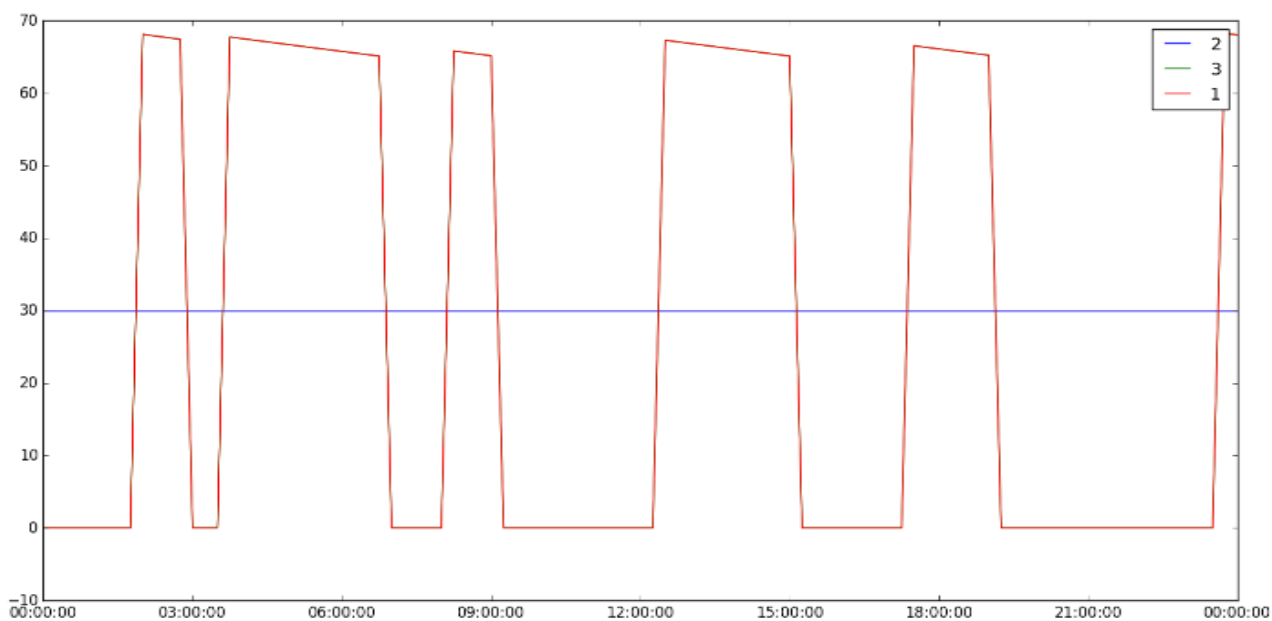


Figura 4.10 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 80 gerações.

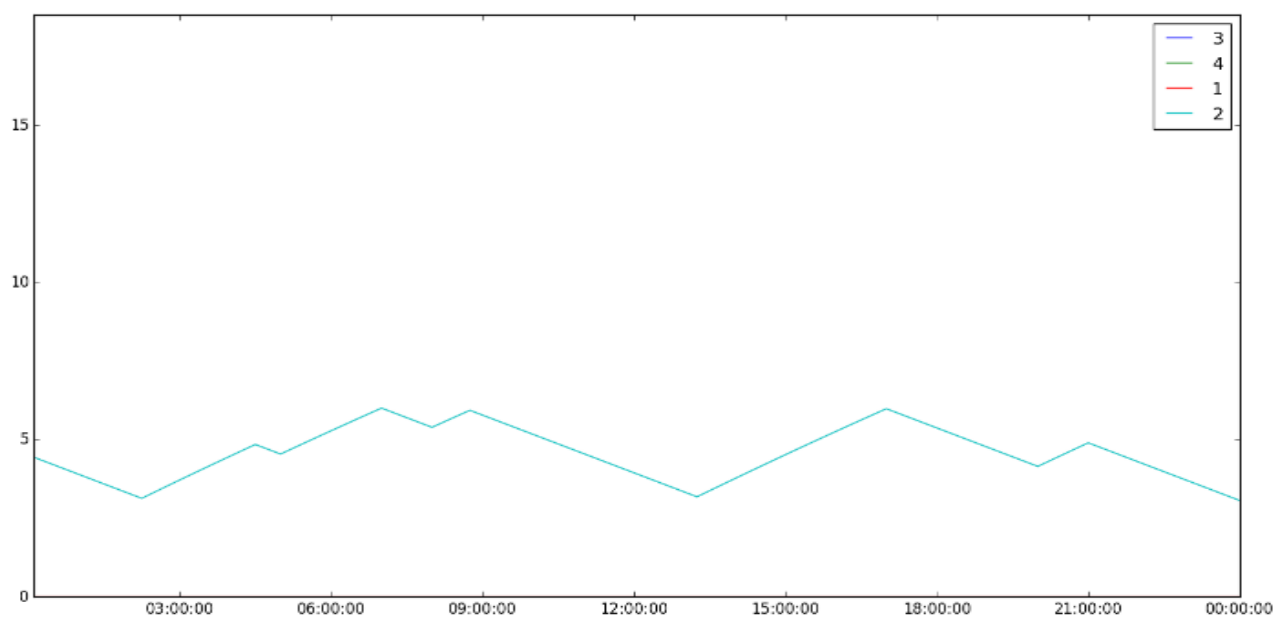


Figura 4.11 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 80 gerações.

O custo específico, em €/m³ que resultou de cada uma destas análises é descrito na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Custo específico resultado das simulações

Número de Gerações	Custo €/m ³
40	0.02335
50	0.02331
80	0.02325

Analisando estes elementos, conclui-se que à medida que o número de gerações aumentava, diminuía o custo específico e que, considerando o funcionamento do grupo, o número de arranques da bomba em instantes em que à partida não seriam necessários também diminui. Porém, ainda existem situações em que o grupo sofre paragens e arranques quase sucessivos e que poderiam ser eliminados. Assim e independentemente de estas soluções ocuparem um tempo computacional bastante reduzido (aproximadamente 1 minuto), resolveu-se que se deveria continuar a aumentar o número de gerações. Por outro lado, uma vez que as soluções continuaram a não ser as mais vantajosas, resolveu-se aumentar também o número de elementos da população. Da Figura 4.12 até à Figura 4.15 é possível verificar os resultados destas simulações através dos mesmos gráficos apresentados anteriormente.

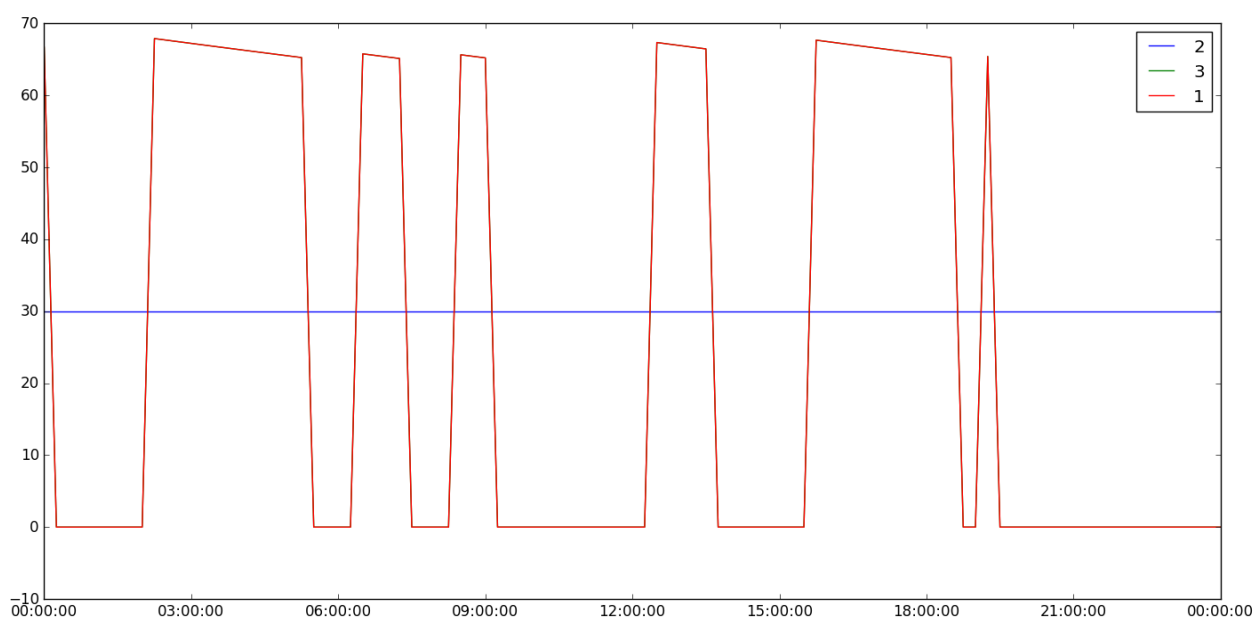


Figura 4.12 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 500 gerações e uma população de 200 elementos.

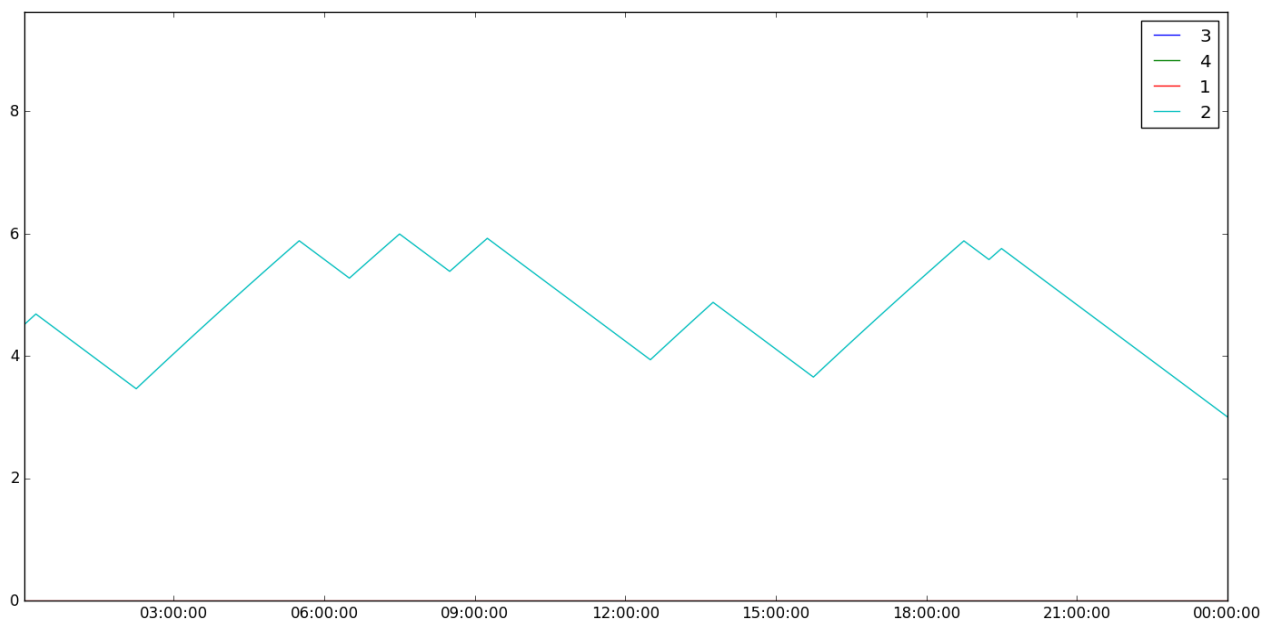


Figura 4.13 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 500 gerações e uma população de 200 elementos

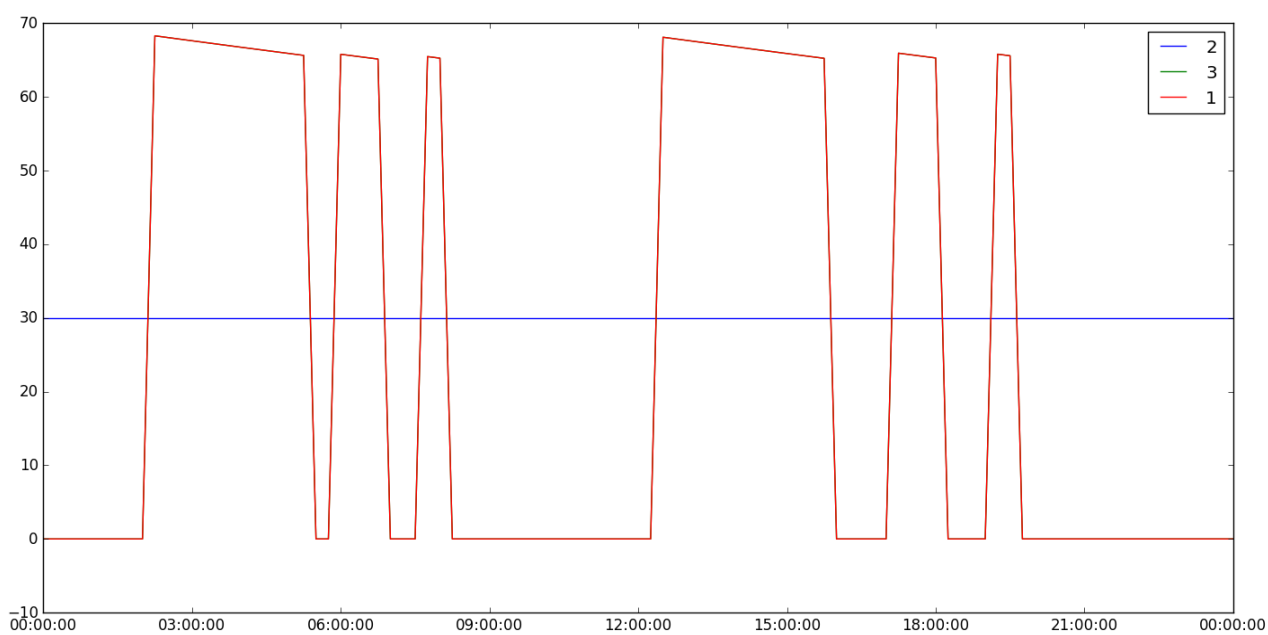


Figura 4.14 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 500 gerações e uma população de 500 elementos

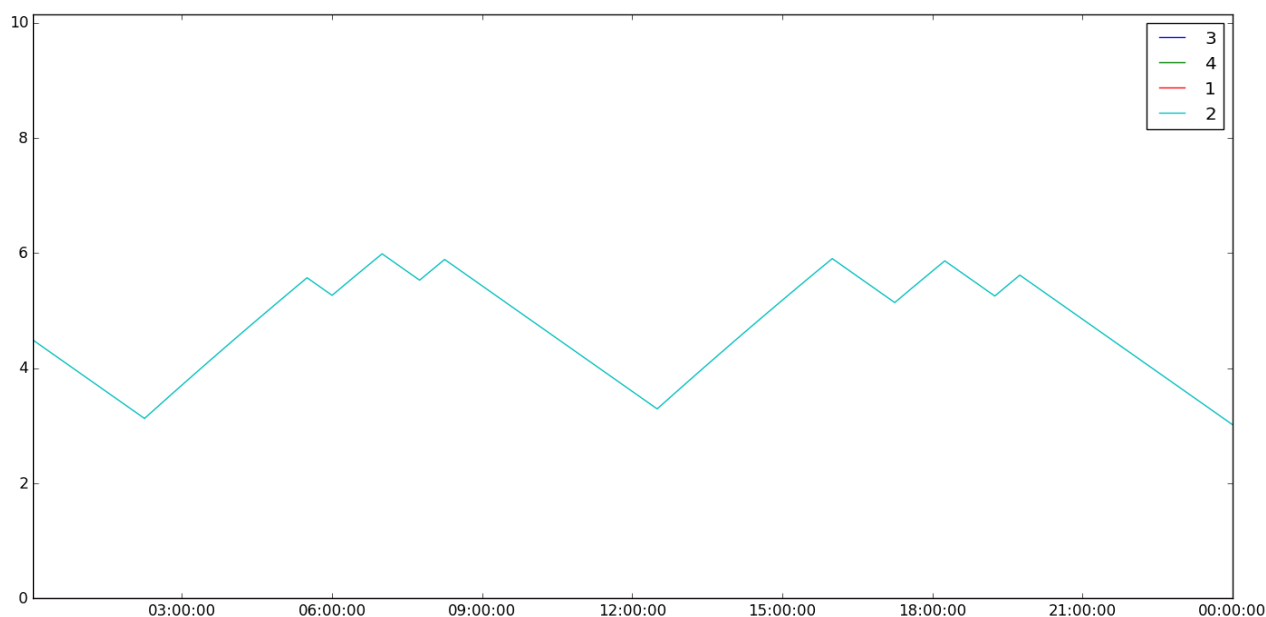


Figura 4.15 - - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 500 gerações e uma população de 500 elementos

O custo específico, em €/m³ que resultou de cada uma destas análises é descrito na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Custo específico resultado das simulações

Número de Gerações	Dimensão da População	Custo €/m3
500	200	0.02288
500	500	0.02278

Como se observa na tabela anterior, o custo específico diminui quando o número de indivíduos da população aumenta, assim como quando avaliados o número de arranques do grupo eletrobomba, também se observa um número inferior para a simulação com uma maior população. Quando observado os gráficos dos níveis de água nos reservatórios, pode concluir-se que a solução de 500 gerações e 500 elementos é também a mais vantajosa, uma vez que exhibe uma maior tendência para a estabilização. Estas soluções já fizeram aumentar o tempo computacional para aproximadamente 13 minutos, o que se considera um valor bastante aceitável.

Apesar de os resultados para 500 gerações e para uma população de 500 já se apresentarem satisfatórios, optou-se por aumentar ainda mais estes valores para verificar até que ponto o aumento destas características deixa de ser significativo. Na Tabela 4.5 é representado o custo específico resultado de algumas destas simulações.

Tabela 4.5 - Custo específico resultado das simulações

Número de Gerações	Dimensão da População	Custo €/m3
1000	1000	0.02268
1000	2000	0.02261
1000	5000	0.02252
1000	6000	0.02254
1000	7000	0.02254

Analisando os resultados da tabela acima, é possível verificar um pequeno aumento do custo específico entre a simulação de 5000 e a de 6000 indivíduos. Uma vez que esta diferença é de apenas 0.09%, não se considerou relevante considerar, uma vez que pode ser resultado da variedade de soluções que existe para cada simulação.

Na Figura 4.16 é representado o valor de score em função do número total de indivíduos que fizeram parte da evolução do algoritmo para a simulação de 7000 indivíduos e 1000 gerações.

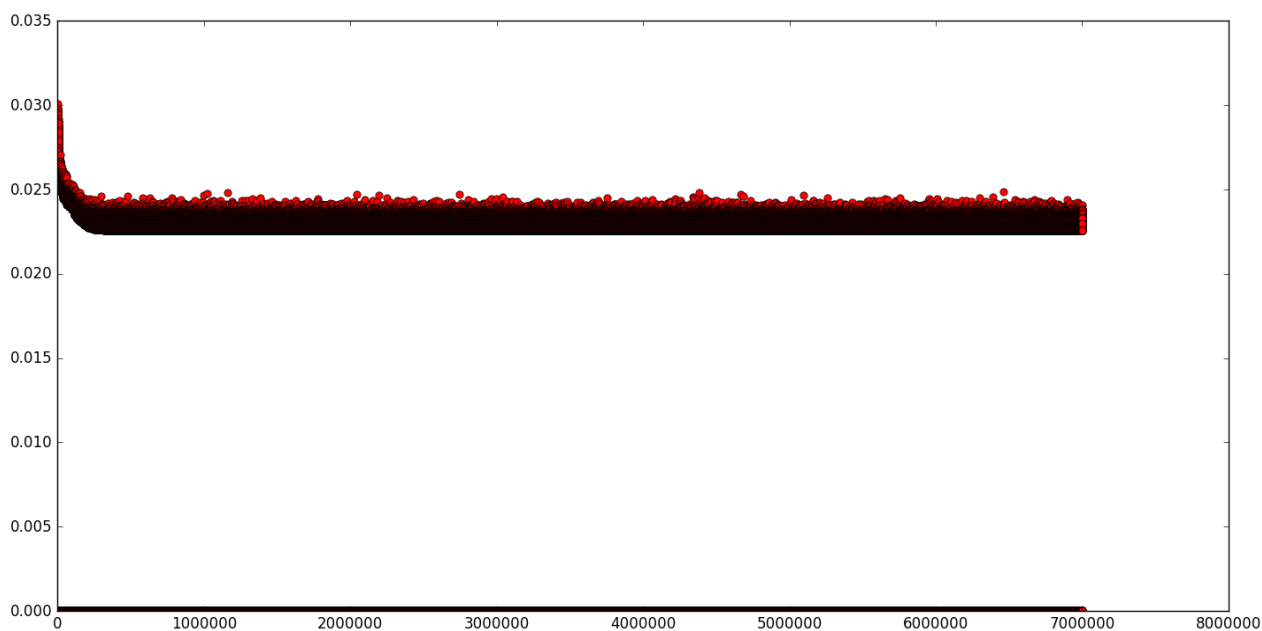


Figura 4.16 – Variação do valor de score ao longo da evolução do Algoritmo para a simulação de 7000 indivíduos e 1000 gerações.

Na figura anterior é possível observar a diversidade do valor de *score* ao longo das gerações que o Algoritmo evoluiu, sendo que os primeiros 7000 valores correspondem à primeira geração e assim sucessivamente até à geração 1000, o que perfaz um total de 7.000.000 indivíduos que foram avaliados na simulação em causa. Saliente-se, no entanto, a rápida aproximação do valor de *score*, até valores próximos do obtido no final, logo nas primeiras gerações.

Da Figura 4.17 à Figura 4.20 são apresentados os gráficos resultantes das simulações de 1000 e de 7000 elementos, para que seja possível comprovar que o aumento do número de indivíduos a partir de estes valores, não se traduz numa diferença considerável nos resultados, para o caso em estudo.

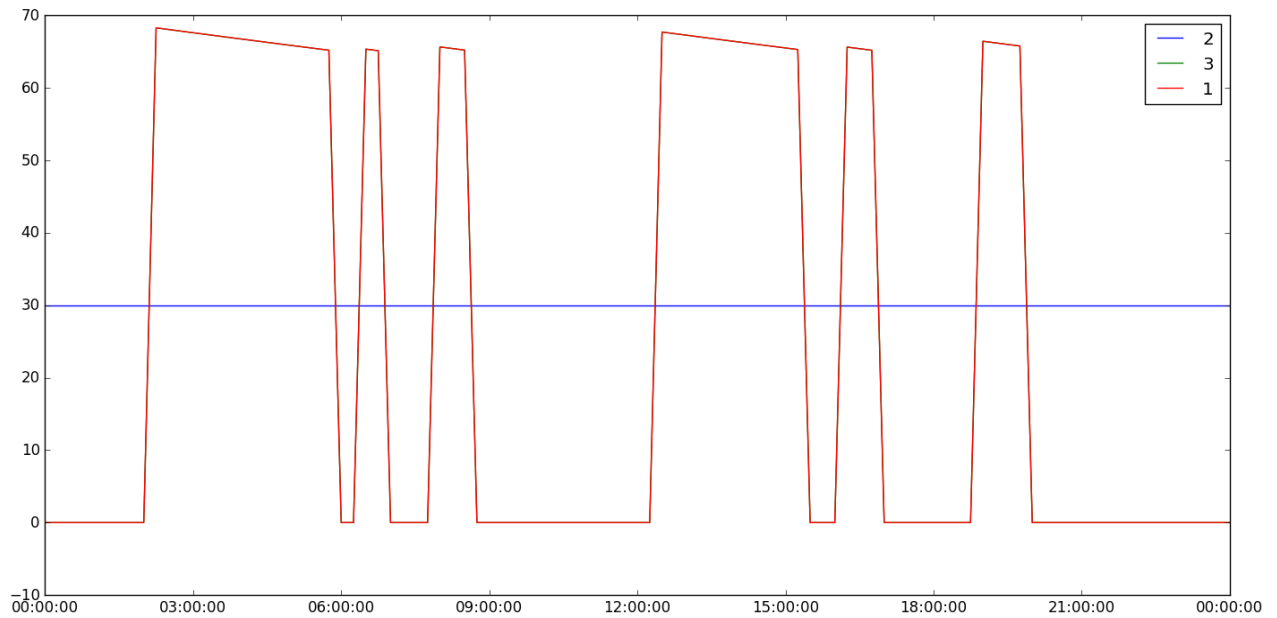


Figura 4.17 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 1000 gerações e uma população de 1000 elementos.

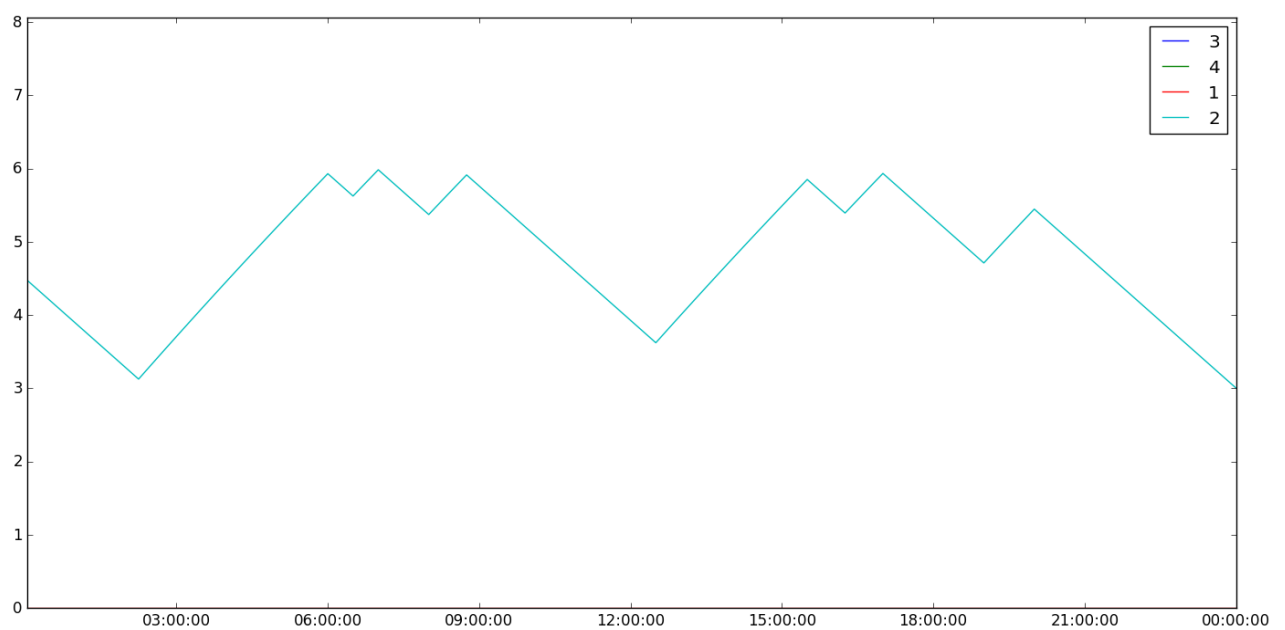


Figura 4.18 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 1000 gerações e uma população de 1000 elementos

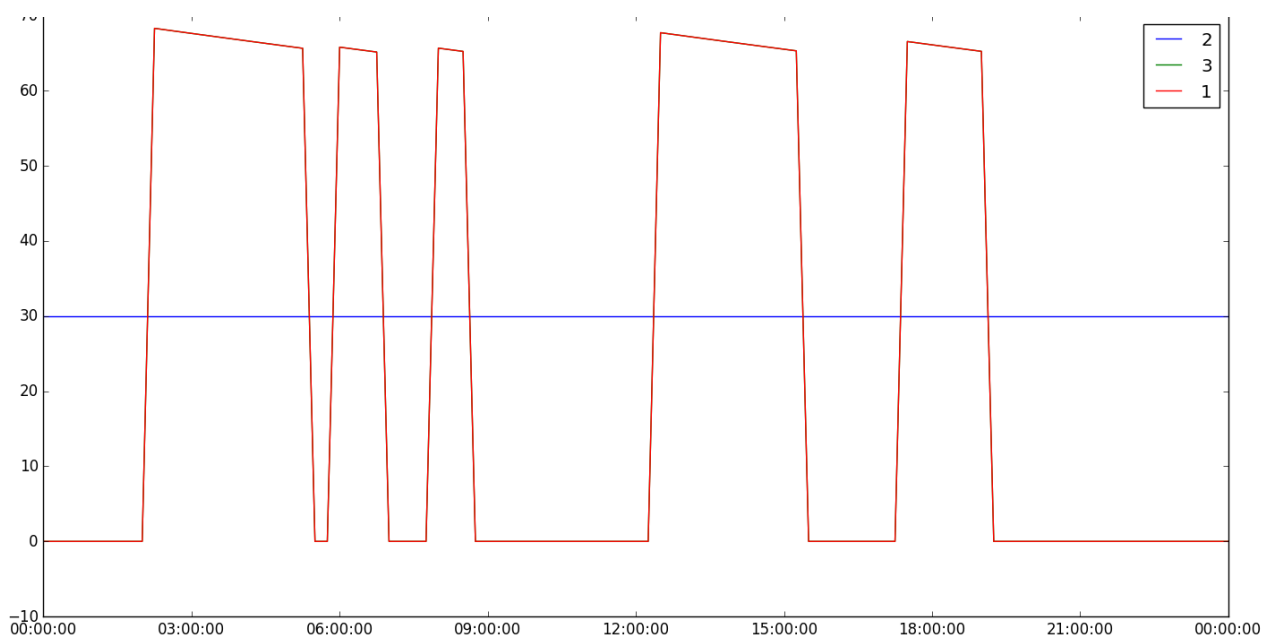


Figura 4.19 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 1000 gerações e uma população de 7000 elementos.

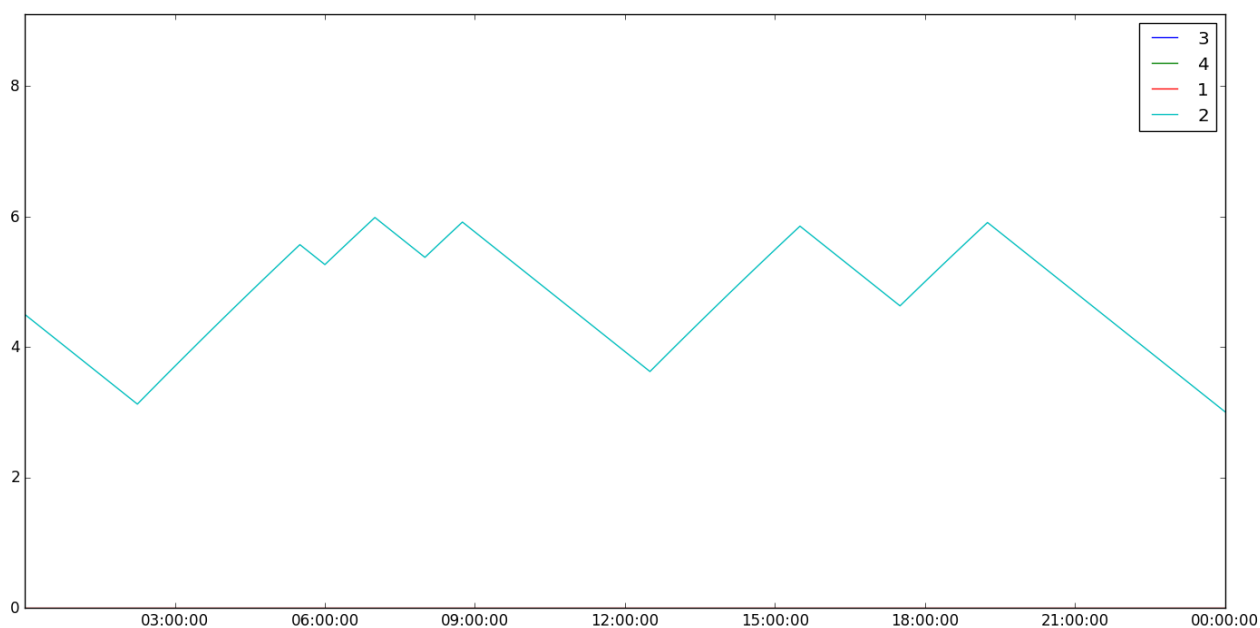


Figura 4.20 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para 1000 gerações e uma população de 7000 elementos

Comparando o número de arranques para a solução de 1000 elementos com a simulação de 7000, é perceptível uma diminuição dos mesmos, o que pode justificar a redução do custo específico.

Relativamente à comparação entre a simulação com 500 gerações e 500 elementos e a simulação de 1000 gerações e de 1000 elementos, verifica-se um número de arranques igual em ambas, assim como um custo específico mais elevado na simulação com a menor população. Apesar de as diferenças não se

considerarem significativas, para o caso em questão e para a análise que se pretende fazer em seguida, é mais vantajoso explorar os diferentes operadores genéticos com uma população de maior dimensão, para excluir a possibilidade de a análise estar a ser condicionada pelo número de elementos.

Face aos resultados obtidos, conclui-se que um número reduzido de elementos da população, assim como um número reduzido de gerações, limitam as soluções consideradas aceitáveis para o problema de otimização. Com as simulações feitas, conclui-se que o aumento do número da população, aumenta a probabilidade de o Algoritmo conseguir chegar a uma solução que origine um custo específico mais reduzido. O número de gerações também é importante mas através das análises realizadas percebeu-se que aumentado a população os resultados melhoravam mais facilmente quando comparados com o número de gerações, o que faz sentido, uma vez que um aumento da população significa um aumento do número de indivíduos para o Algoritmo avaliar, logo a probabilidade de resultar uma solução mais vantajosa aumenta. Conclui-se também que a partir de um certo número de elementos da população, não se observam grandes diferenças a nível de resultado final, para o mesmo número de gerações.

4.5.2.2 Operadores Genéticos

Para proceder à análise a nível dos operadores genéticos mais apropriados para o exemplo em questão, optou-se por considerar uma população com 1000 elementos e 1000 gerações. Estes valores foram considerados tendo em atenção que para uma dimensão da população mais extensa, o tempo despendido para o processamento do algoritmo também se tornava demasiado excessivo. Para esta dimensão da população o tempo de processamento é de 1 hora aproximadamente. Foram testados todos os operadores e por cada grupo foi selecionado o que apresentou uma melhor solução para prosseguir para a análise de outro operador.

- **Initializators:** Começando por a função de inicialização, da Figura 4.21 à Figura 4.24 são apresentados os resultados das simulações, para cada rotina aplicável ao exemplo em estudo.

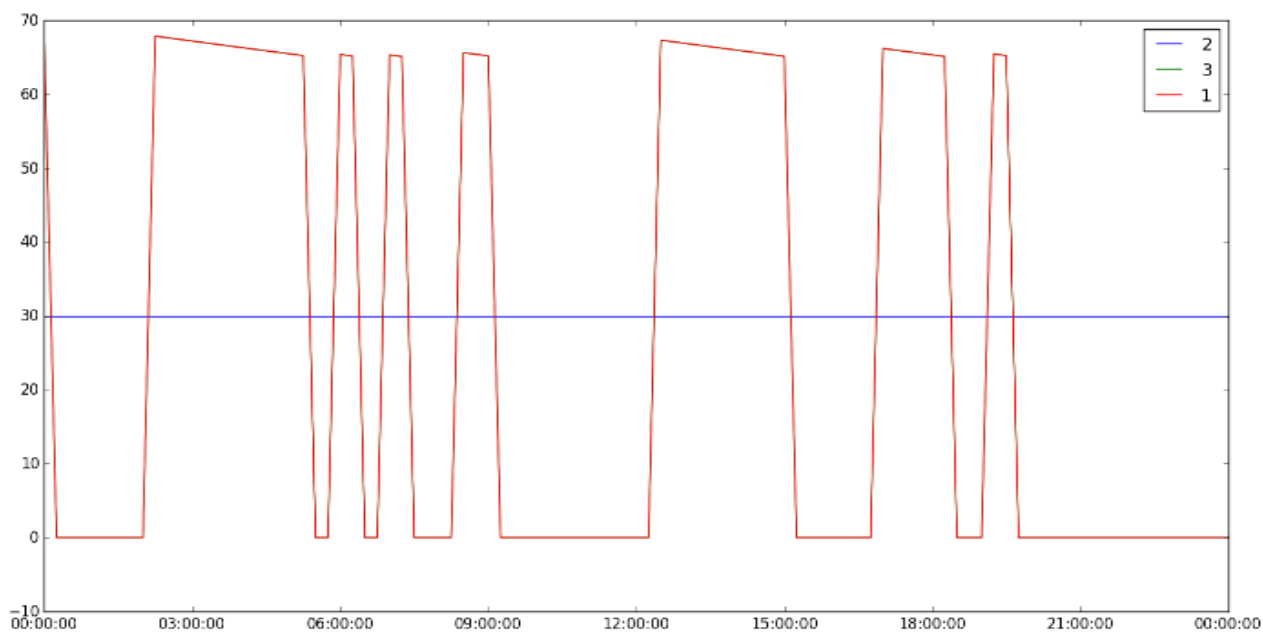


Figura 4.21 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DListInitalizatorInteger*.

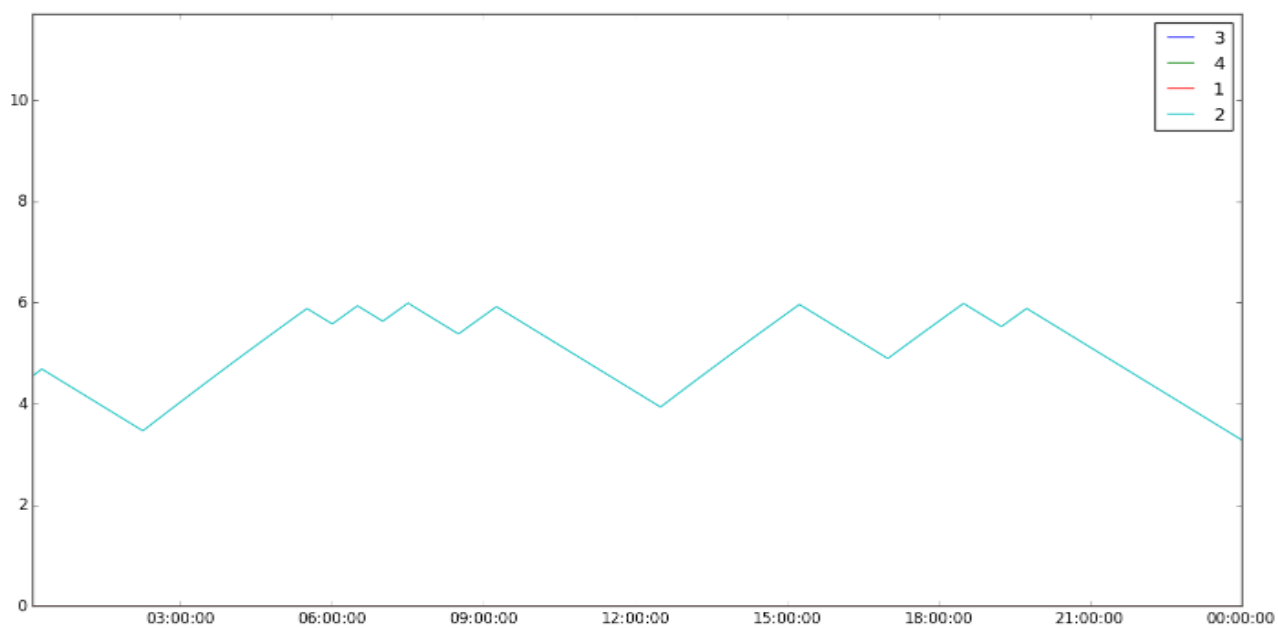


Figura 4.22 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DListInitalizatorInteger*.

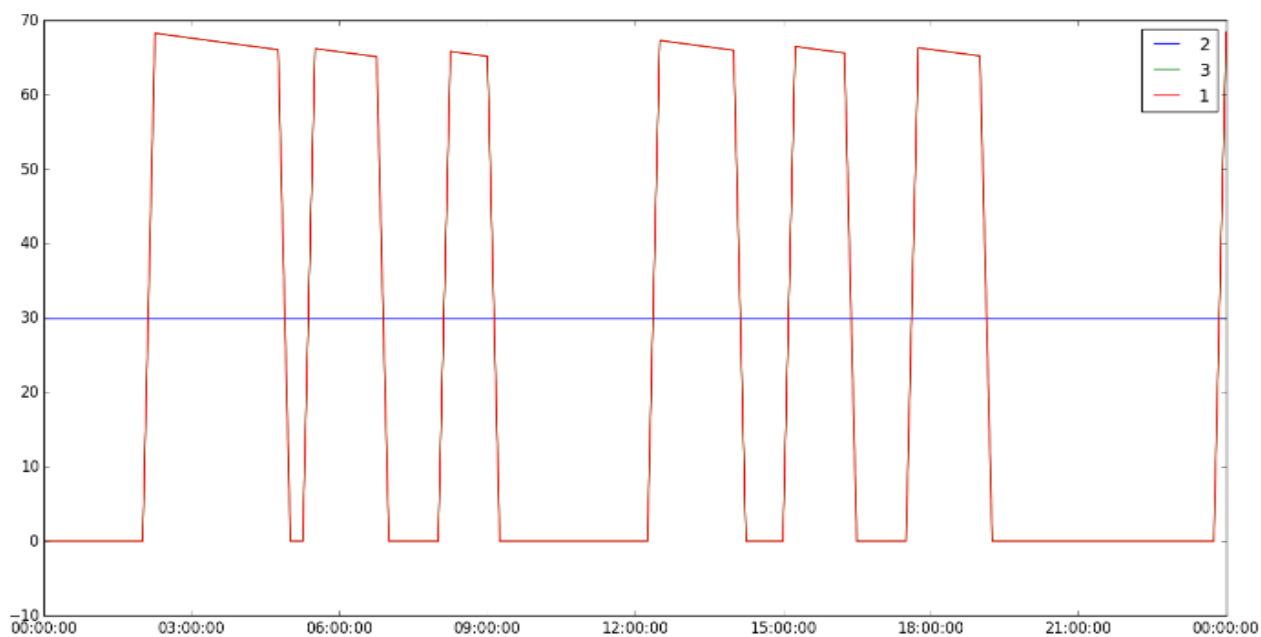


Figura 4.23 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringInitializer*

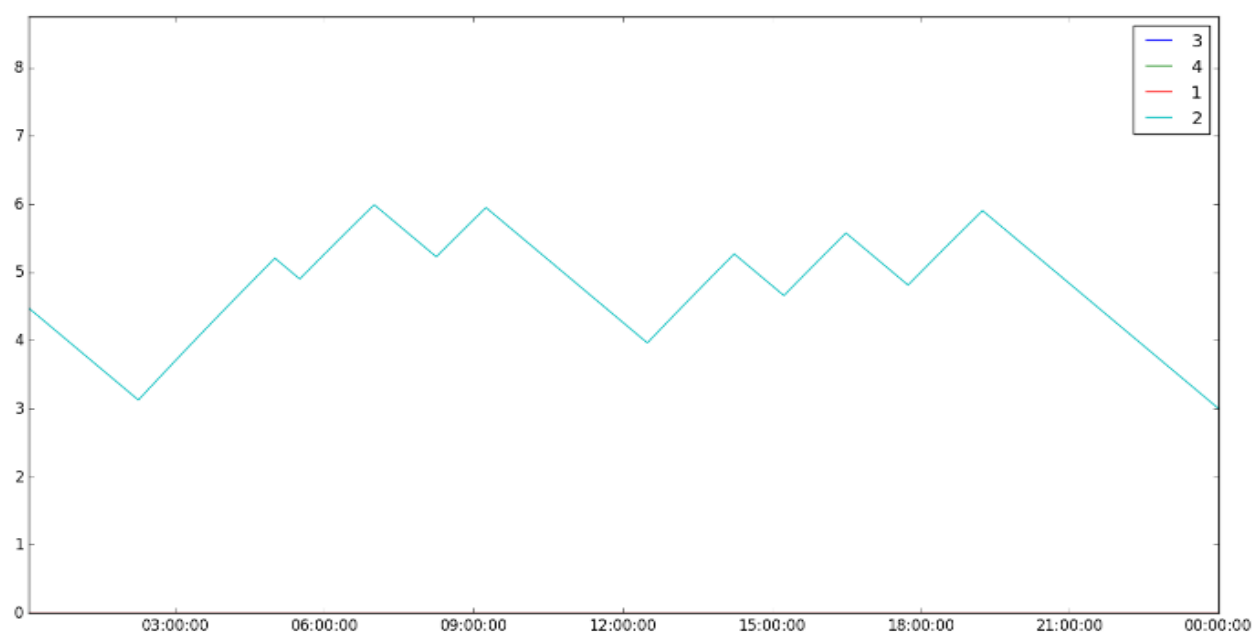


Figura 4.24 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringInitializer*

O custo específico para cada uma destas simulações é apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Custo específico resultado das simulações

Operador	Custo (€/m ³)
G1DListInitializerInteger	0.022833
G1DBinaryStringInitializer	0.022834

Analisando estes resultados, pode concluir-se que a rotina mais vantajosa para a função de inicialização é *G1DBinaryStringInitializer*. Esta rotina por ser binária e selecionar aleatoriamente valores de 0 ou 1, origina um funcionamento do grupo eletrobomba mais vantajoso, nomeadamente no que diz respeito ao número de arranques. Comparando os gráficos de nível de água no reservatório, pode concluir-se que para a rotina *G1DBinaryStringInitializer* o reservatório apresenta uma maior tendência para a estabilização. Apesar de o custo específico que resultou desta simulação ser ligeiramente mais elevado, considerou-se mais apropriado a utilização desta rotina para prosseguir com a análise.

- **Mutators:** Relativamente à função de mutação, foram testadas as rotinas *G1DListMutatorIntegerBinary*, *G1DBinaryStringMutatorFlip*, *G1DBinaryStringMutatorSwap*, *G1DListMutatorIntegerGaussian* e *G1DListMutatorIntegerRange* cujos resultados são apresentados nos gráficos da Figura 4.25 à Figura 4.34

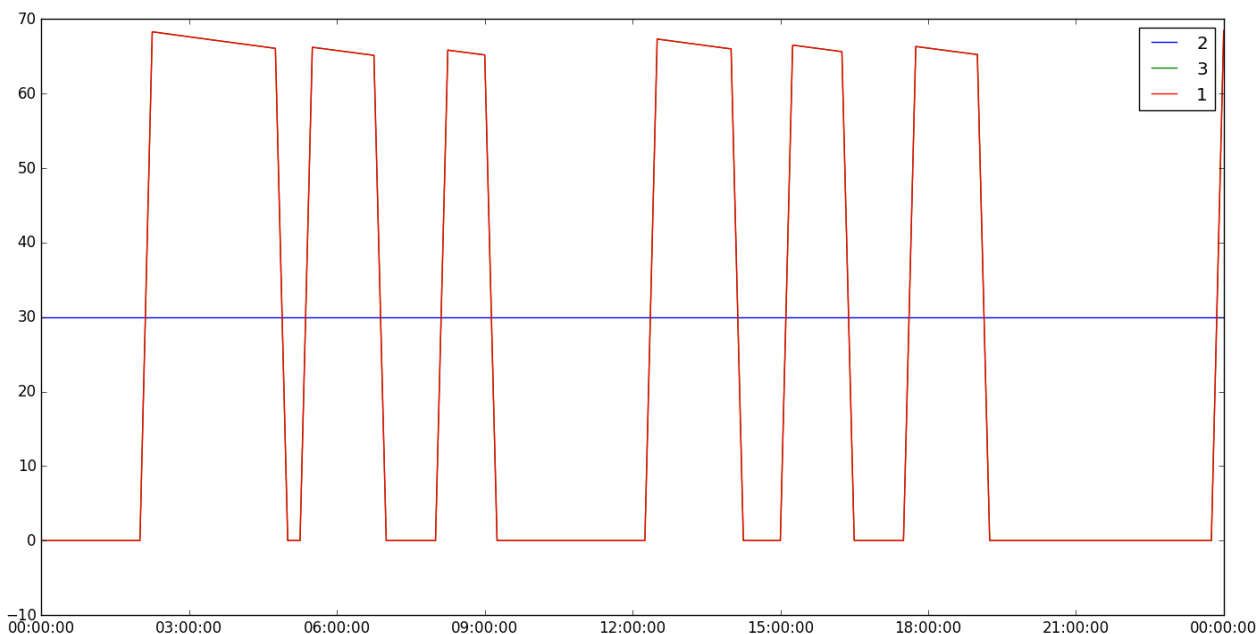


Figura 4.25 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DListMutatorIntegerBinary*

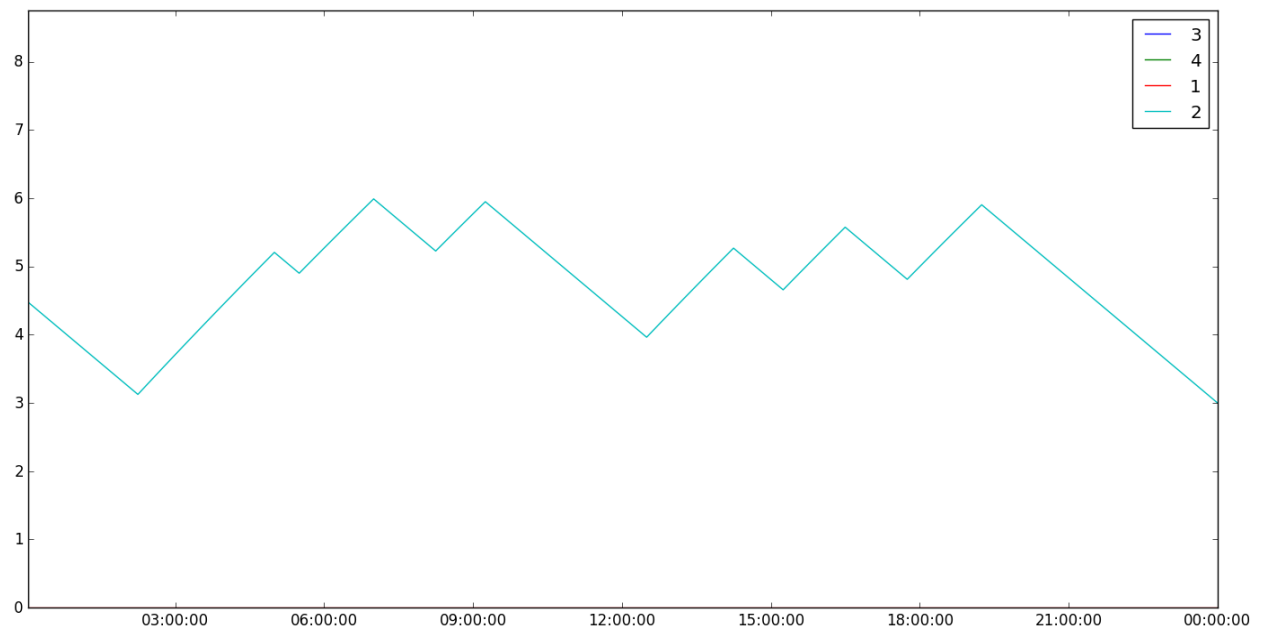


Figura 4.26 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DListMutatorIntegerBinary*

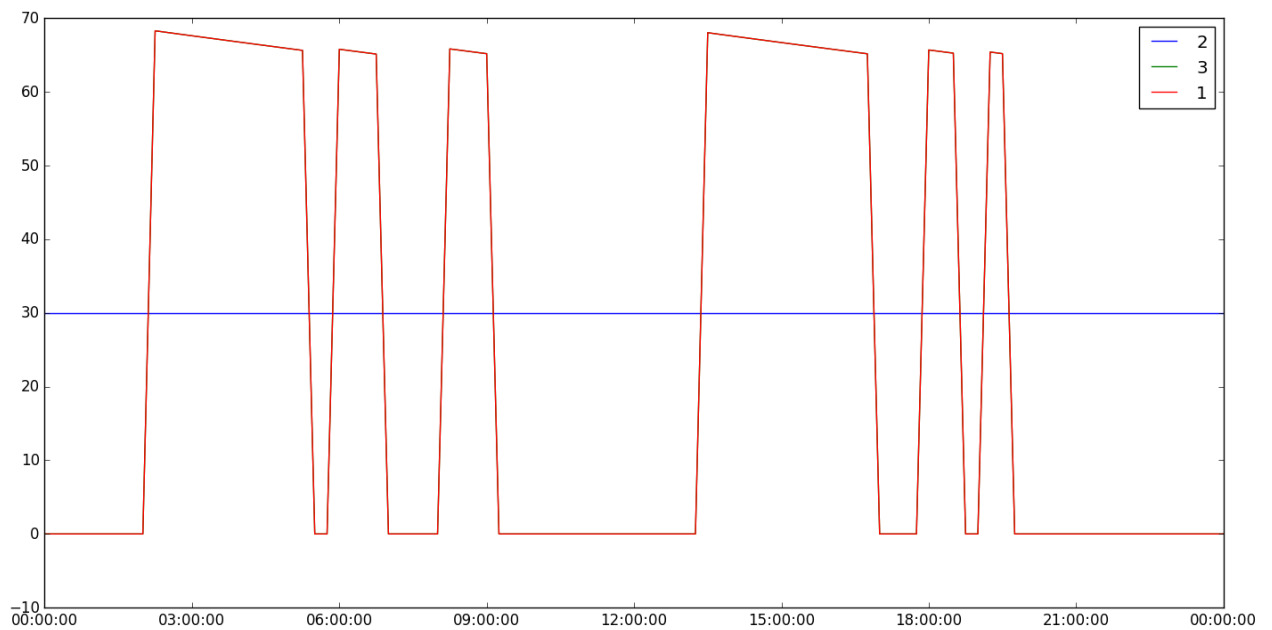


Figura 4.27 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringMutatorFlip*

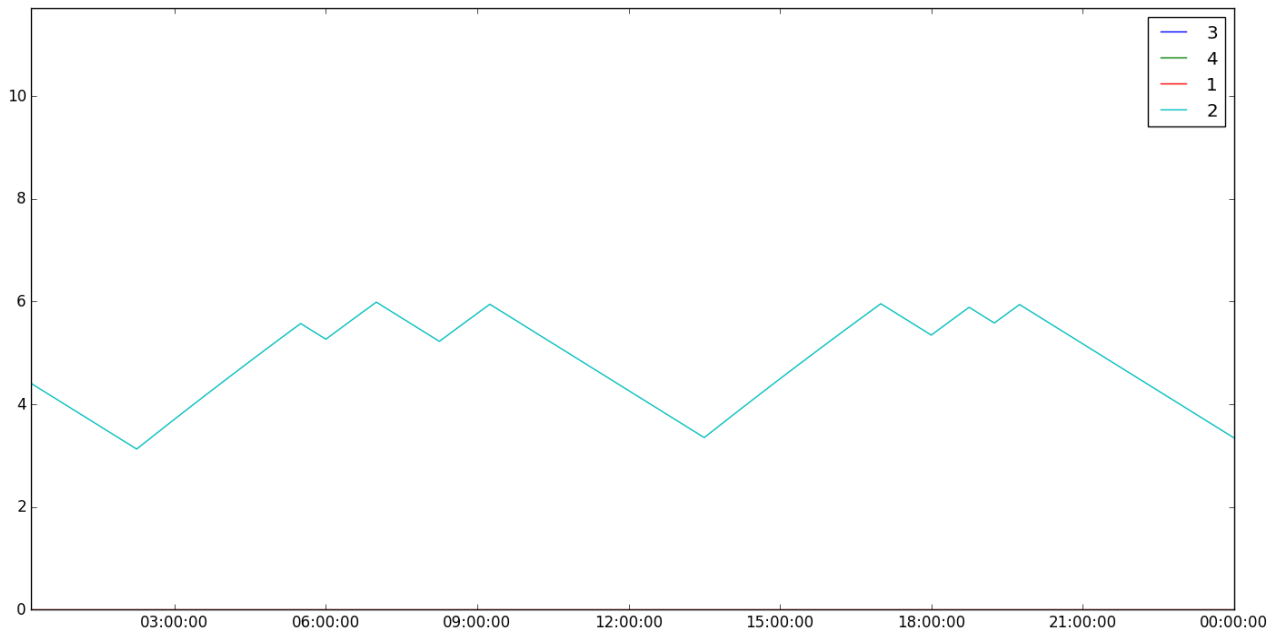


Figura 4.28 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringMutatorFlip*

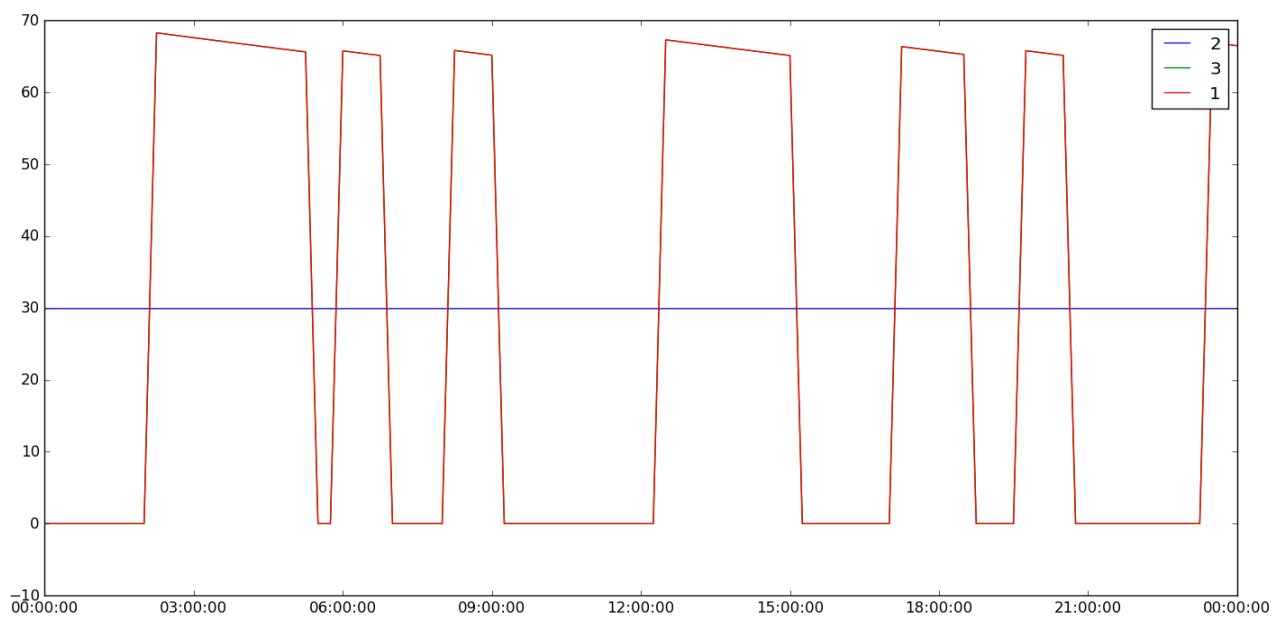


Figura 4.29 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringMutatorSwap*

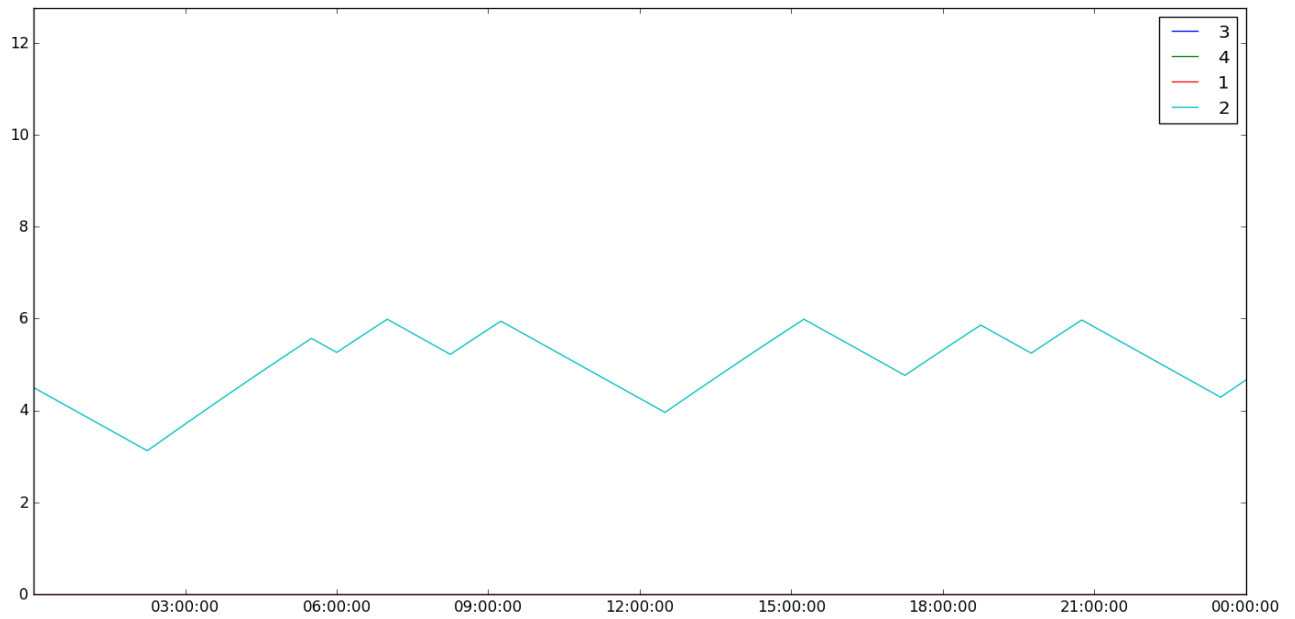


Figura 4.30 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringMutatorSwap*

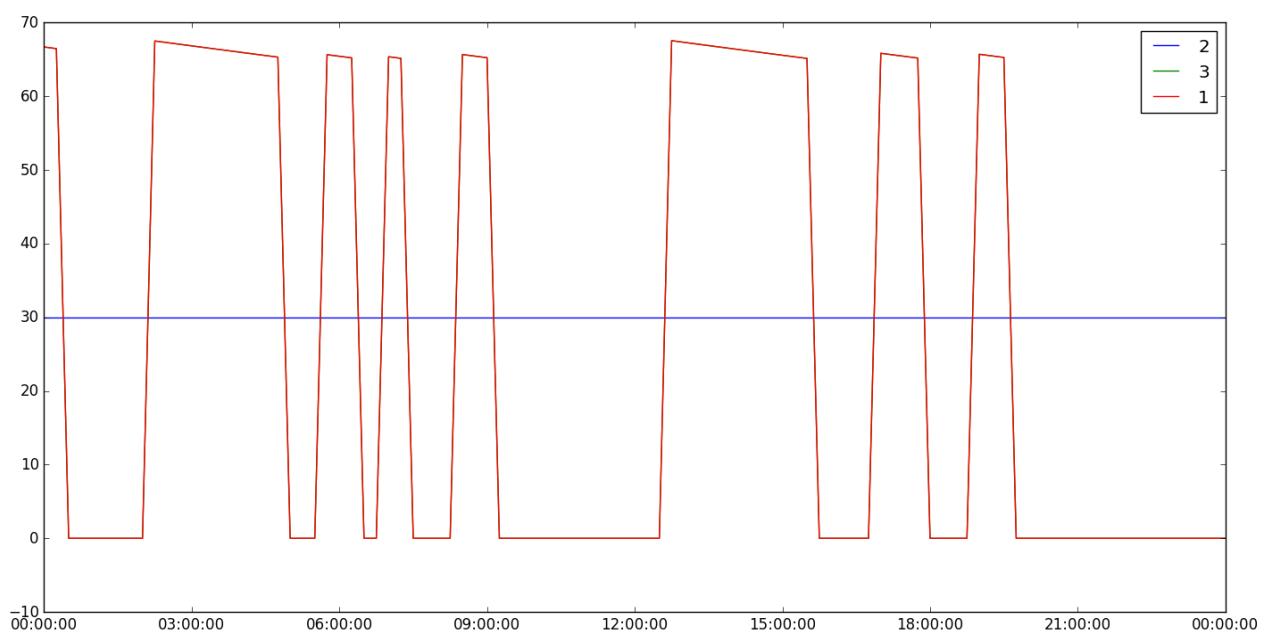


Figura 4.31 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DListMutatorIntegerGaussian*

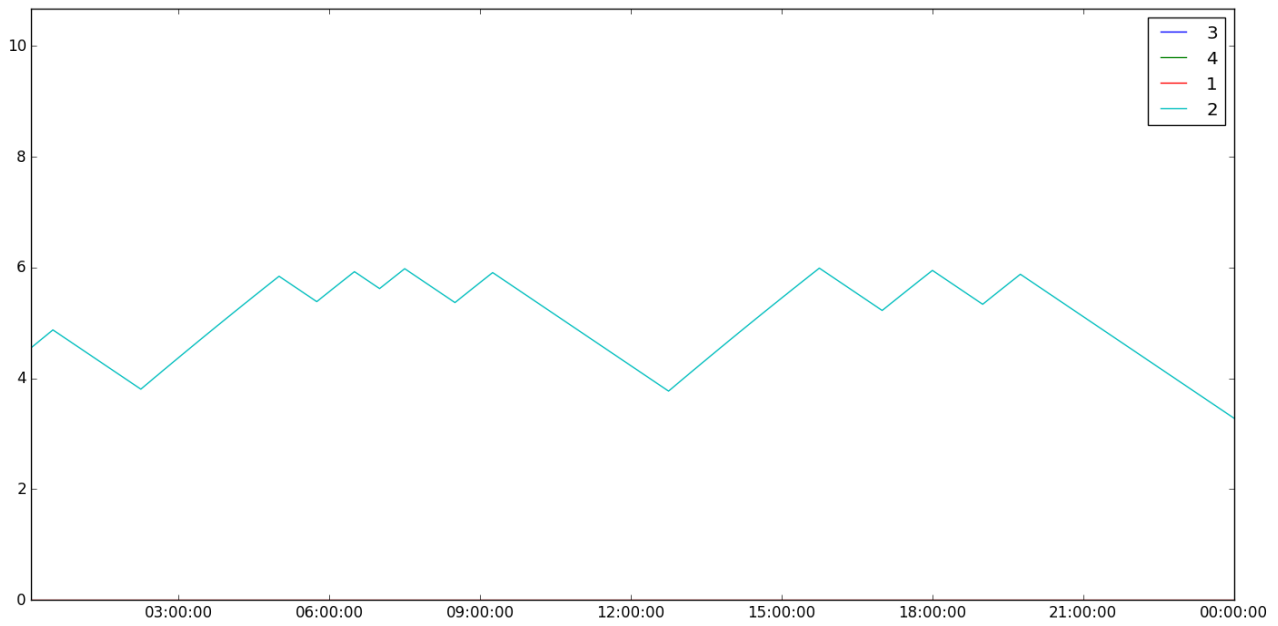


Figura 4.32 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DListMutatorIntegerGaussian*.

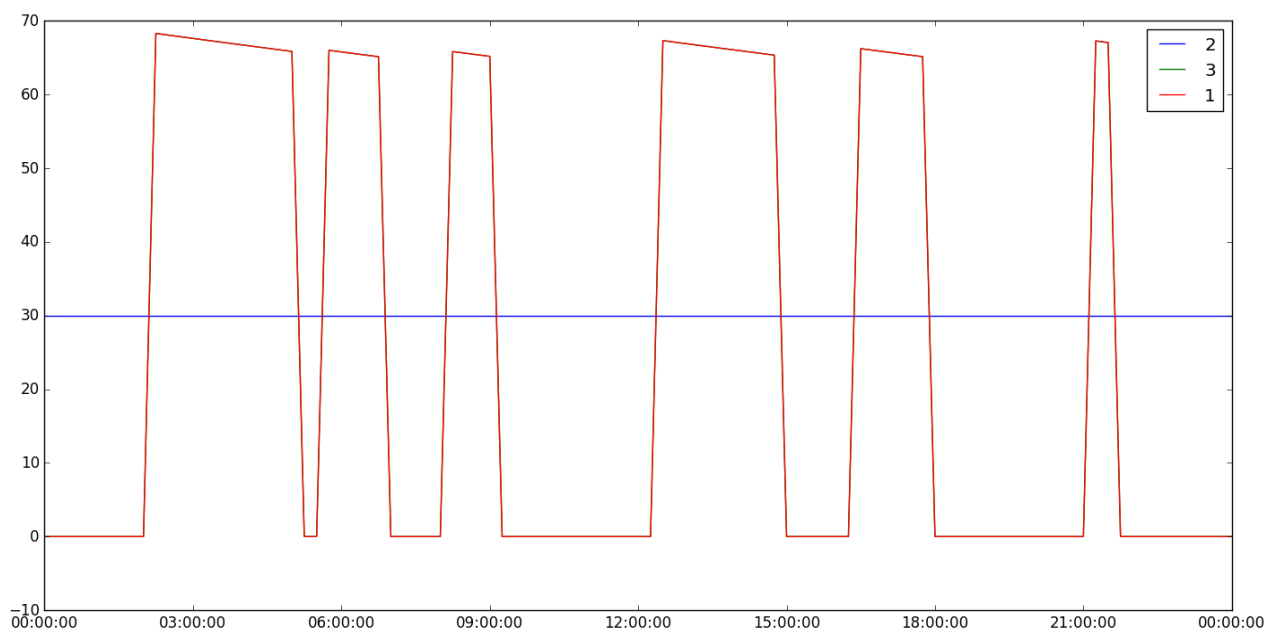


Figura 4.33 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DListMutatorIntegerRange*

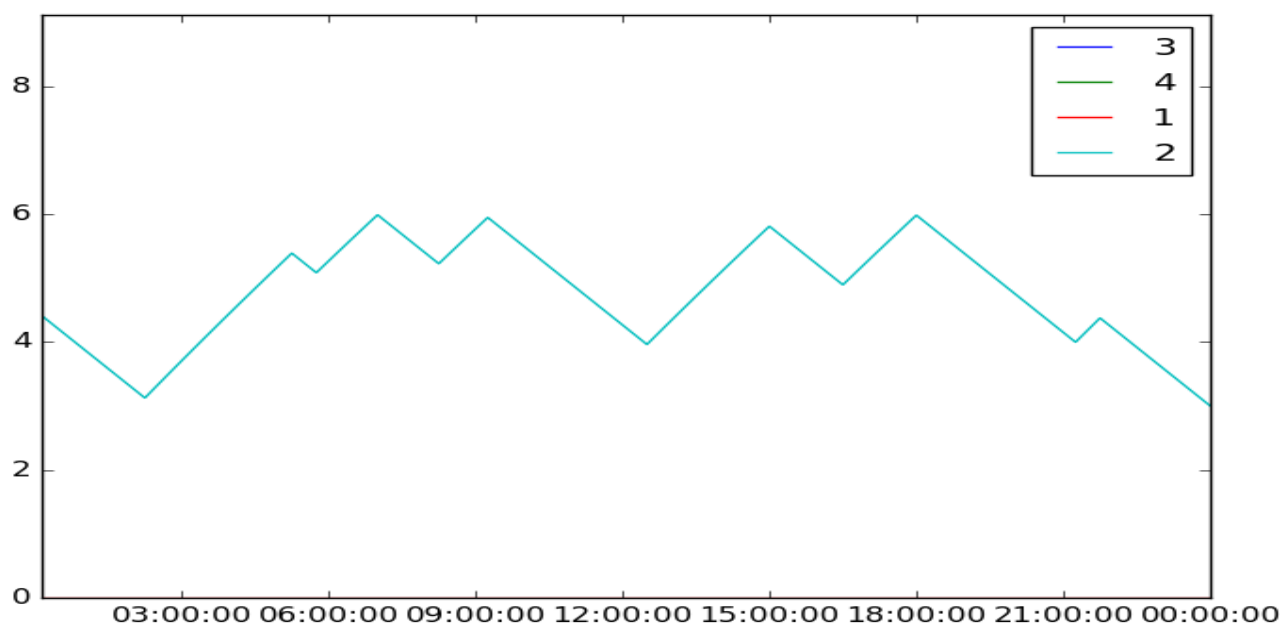


Figura 4.34 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DListMutatorIntegerRange*

O custo específico para cada uma destas simulações é apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Custo específico resultado das simulações

Operador	Custo (€/m ³)
<i>G1DListMutatorIntegerBinary</i>	0.02284
<i>G1DBinaryStringMutatorFlip</i>	0.02280
<i>G1DBinaryStringMutatorSwap</i>	0.02307
<i>G1DListMutatorIntegerGaussian</i>	0.02291
<i>G1DListMutatorIntegerRange</i>	0.02273

Avaliando os resultados das várias simulações, conclui-se que a que apresenta um pior resultado a nível do número de arranques é a rotina *G1DListMutatorIntegerGaussian*, que por sua vez também apresenta um custo específico elevado. Todas as outras simulações são passíveis de serem consideradas aceitáveis, tanto no que diz respeito ao número de arranques, como à evolução do nível de água nos reservatórios. Posto isto, e apesar de não possuir o custo específico mais baixo, optou-se por considerar a rotina *G1DListMutatorIntegerBinary* por ser uma rotina de funcionamento binário e considerar aleatoriamente os valores de 0 e 1. Convém, todavia, salientar que entre as opções que têm por base seletores binários, não se observam grandes diferenças na utilização das mesmas, para o caso em estudo.

- **Selector:** Relativamente à função de seleção, foram testadas as rotinas *GRankSelector*, *GRouletteWheel*, *GTournamentSelector*, *GUniformSelector*, cujos resultados são apresentados nos gráficos da Figura 4.35 à Figura 4.42.

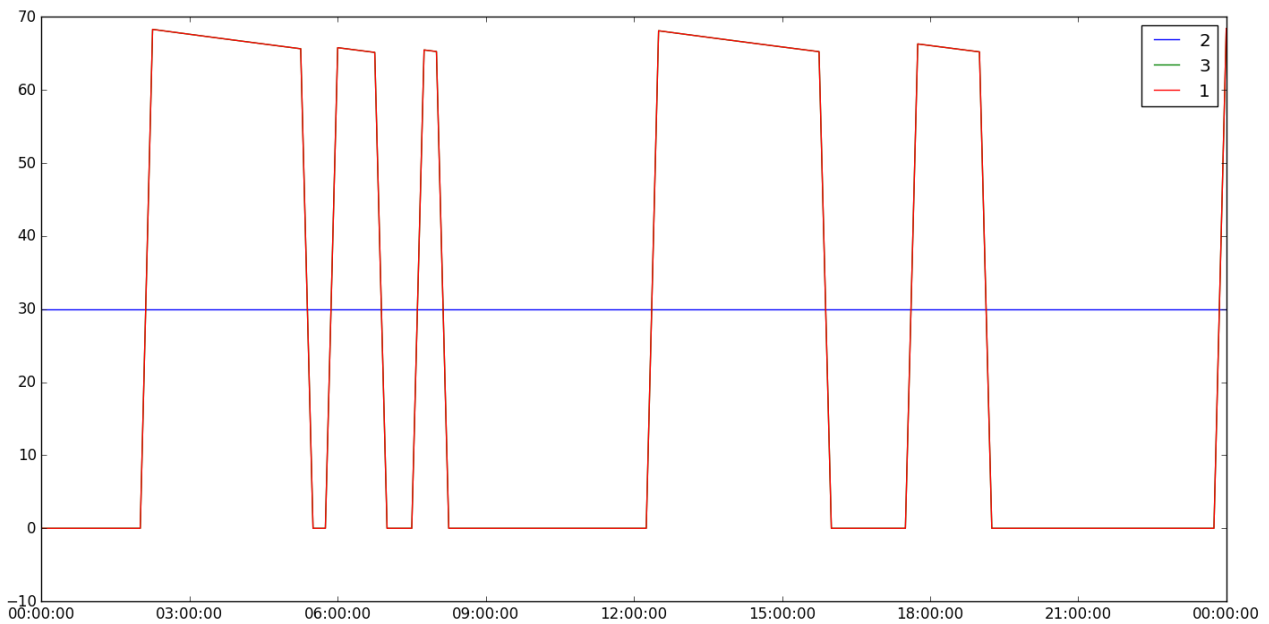


Figura 4.35 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *GRankSelector*.

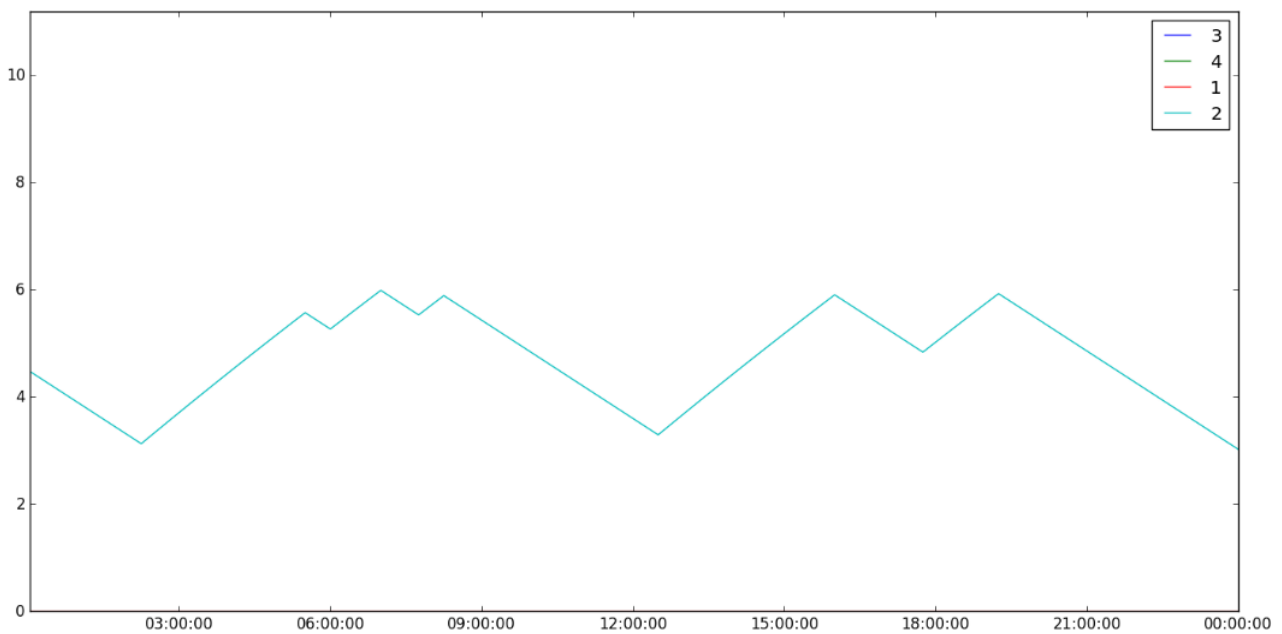


Figura 4.36 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *GRankSelector*

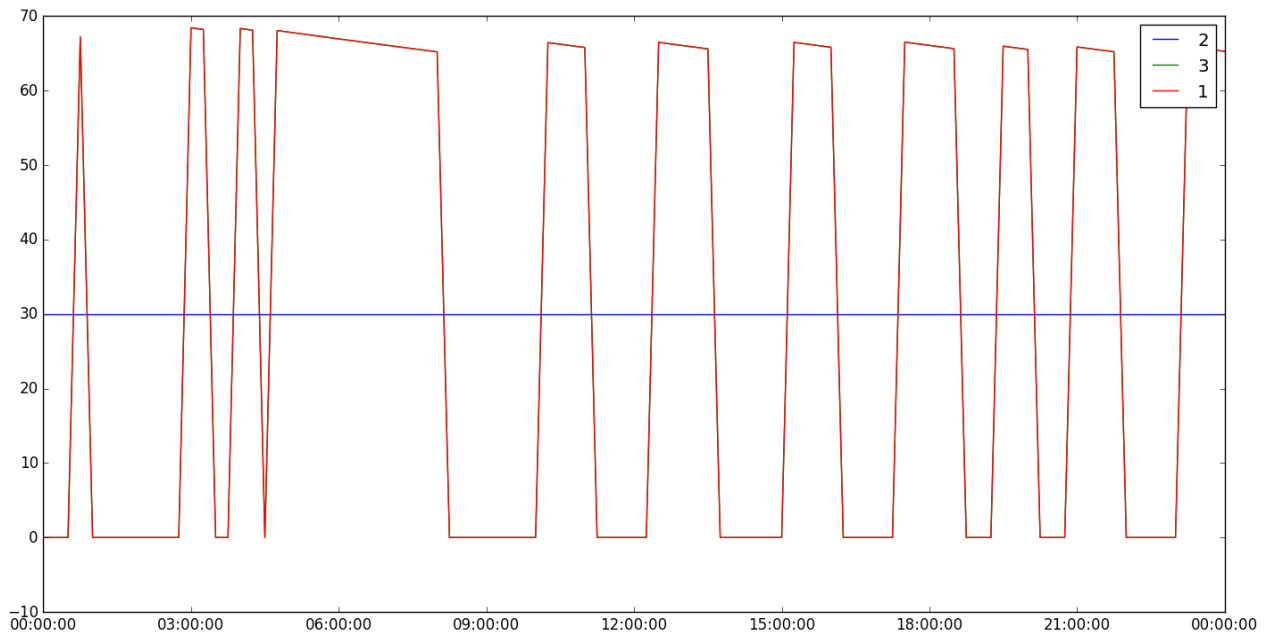


Figura 4.37 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *GRouletteWheel*

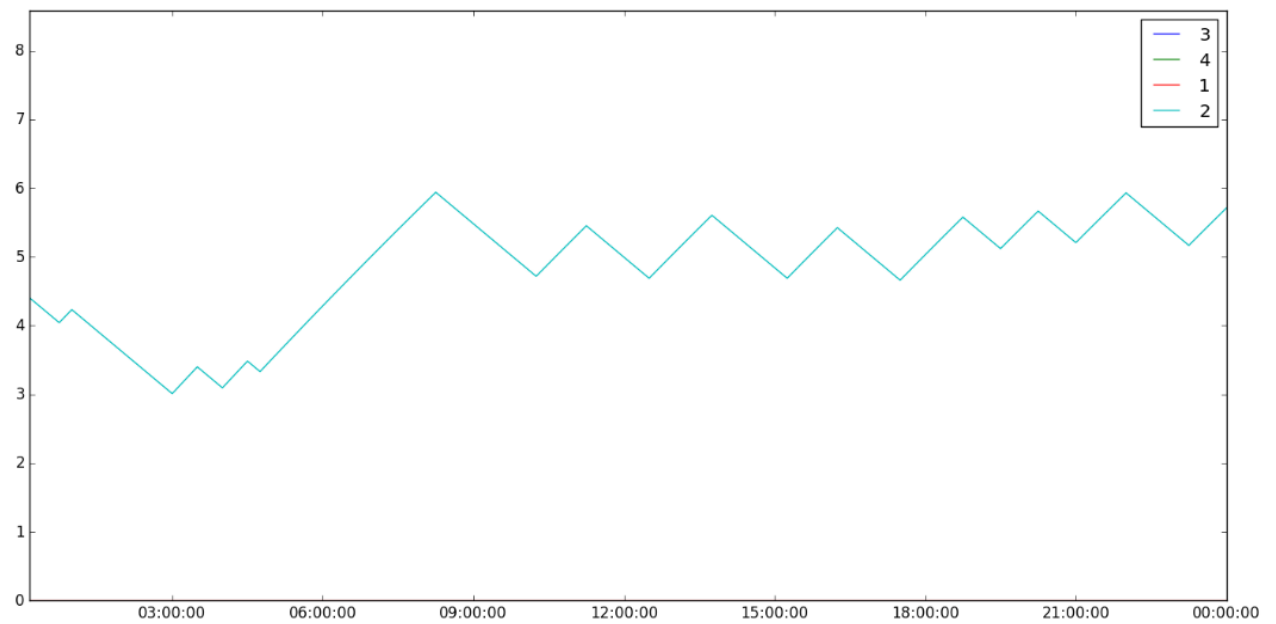


Figura 4.38 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *GRouletteWheel*.

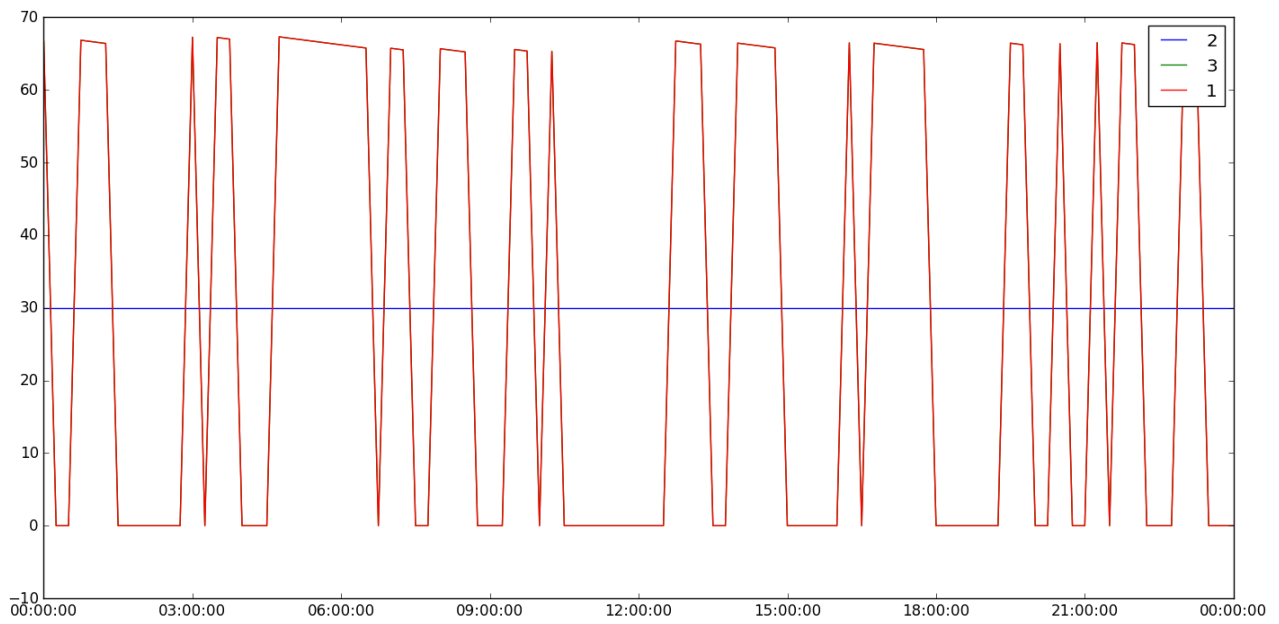


Figura 4.39 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *GTournamentSelector*

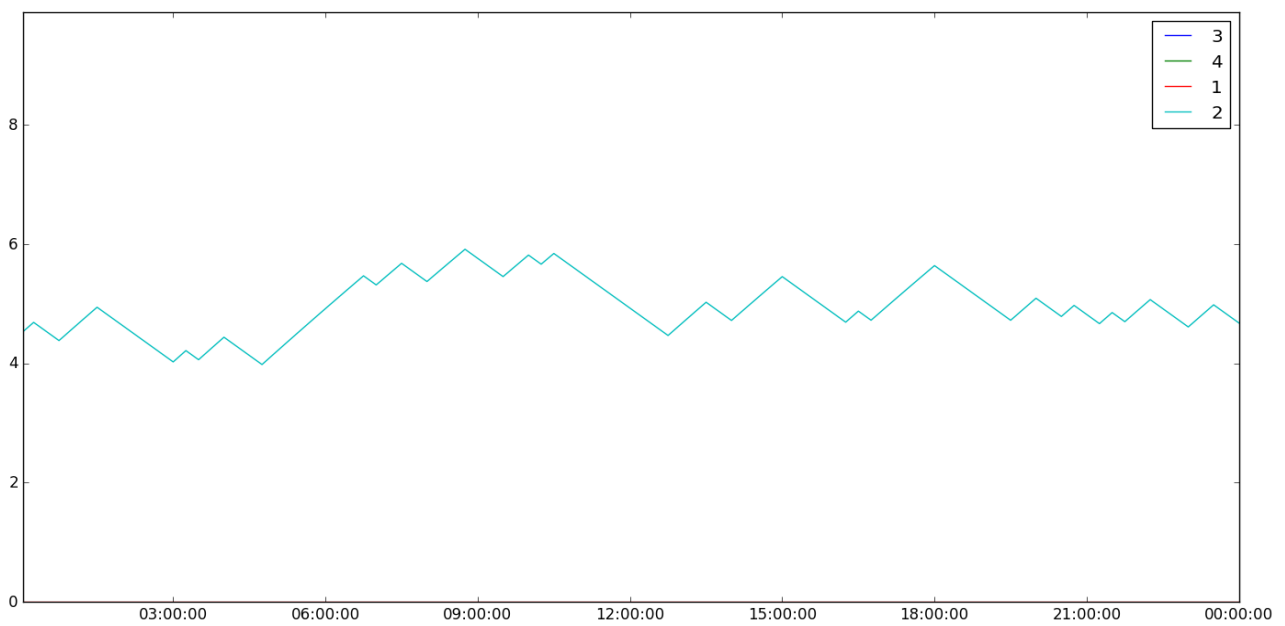


Figura 4.40 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *GTournamentSelector*

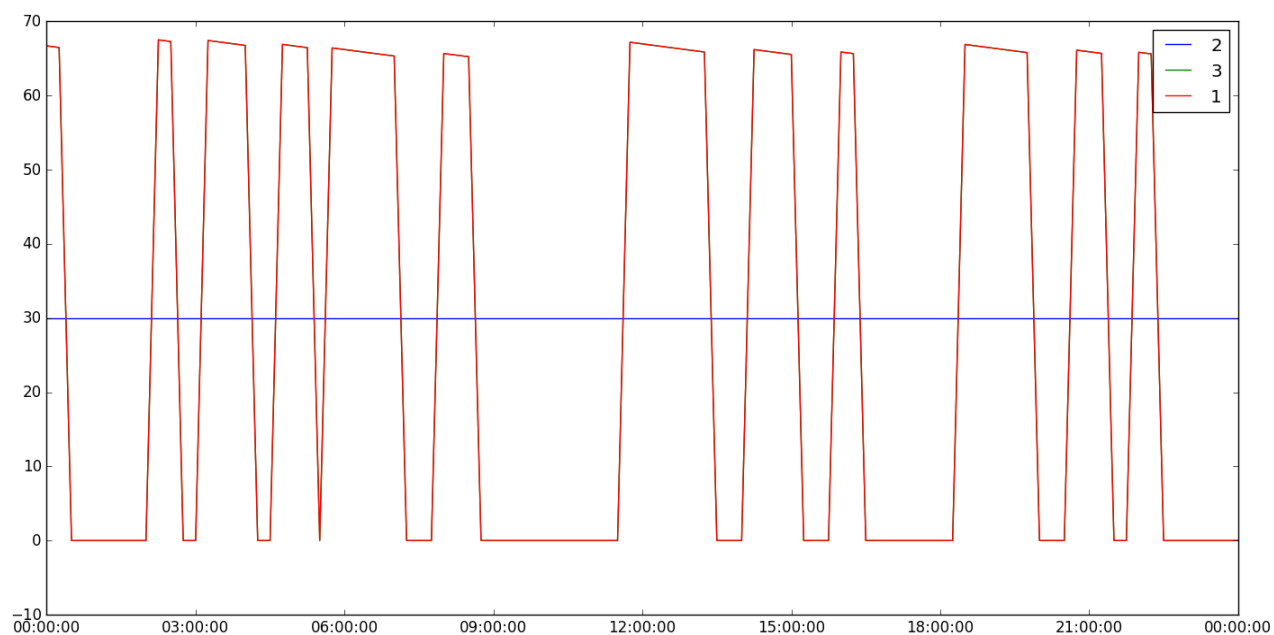


Figura 4.41 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *GUniformSelector*

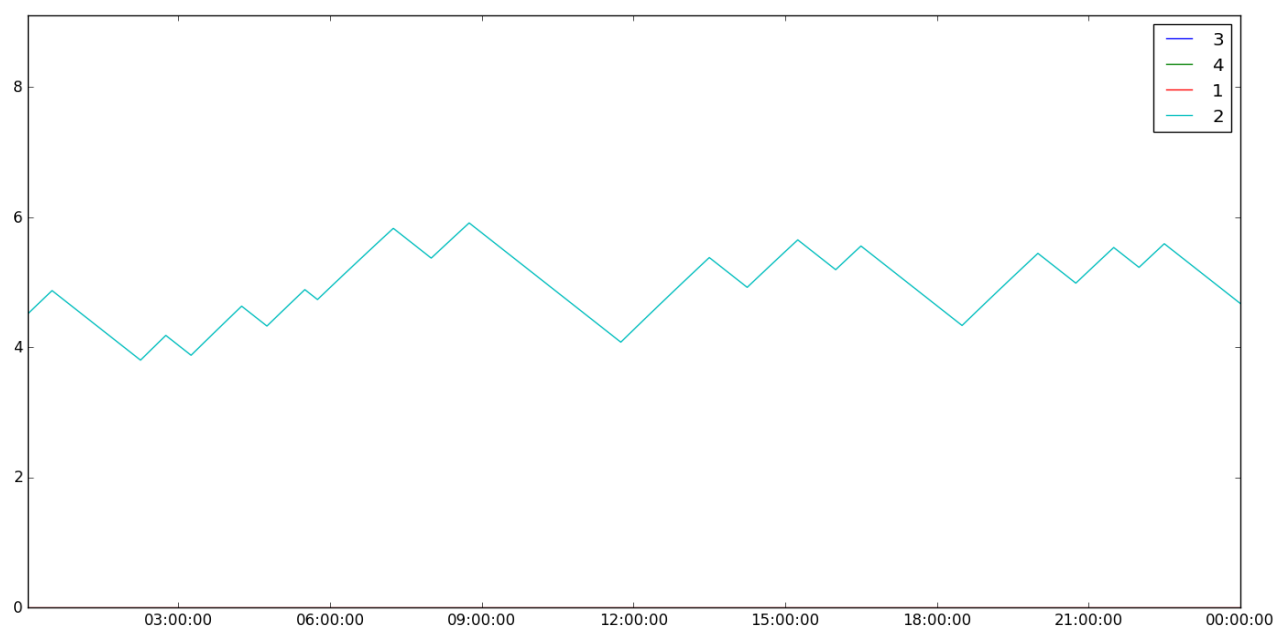


Figura 4.42 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *GUniformSelector*

O custo específico para cada uma destas simulações é apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Custo específico resultado das simulações

Operador	Custo (€/m ³)
<i>GRankSelector</i>	0.02270
<i>GRouletteWheel</i>	0.02458
<i>GTournamentSelector</i>	0.02565
<i>GUniformSelector</i>	0.02498

Os resultados obtidos destas simulações mostraram-se bastante diferentes entre as diversas rotinas, o que facilitou na seleção da rotina mais indicada. Atendendo à diversidade das rotinas apresentadas, cada uma delas utiliza um método diferente para a seleção dos indivíduos. Na rotina *GRankSelector*, o Algoritmo avalia todos os elementos através do seu valor de *fitness* e escolhe os que apresentam o melhor valor. Daí esta solução ser a que apresenta melhor resultados, tanto ao nível do custo específico, como quanto ao número de arranques, uma vez que de todos os elementos, são selecionados apenas os que apresentam uma maior aptidão. Esta rotina pode ser comparada com a *GRouletteWheel* que também avalia os elementos pelo valor de *fitness* mas a seleção é feita de modo aleatório, sendo que quanto melhor for o elemento, mais hipótese tem de ser selecionado uma vez que a rotina agrupa os elementos conforme a sua aptidão. Devido a esta forma aleatória de selecionar os elementos, esta rotina torna-se menos aplicável ao caso em questão uma vez que não há garantia que todos os elementos selecionados sejam os melhores, o que faz com que o custo específico da simulação que utiliza esta rotina resulte superior. Relativamente à *GTournamentSelector*, esta apresenta resultados claramente piores, uma vez que os valores são selecionados por grupos de forma aleatória, sendo que os melhores são selecionados para constituir a geração, sendo esta operação repetida até ter a geração concluída. Este método prejudica o comportamento do sistema uma vez que os valores selecionados anteriormente podem não corresponder aos melhores cromossomas, originando um funcionamento inadequado do grupo. A rotina, *GUniformSelector*, devido à forma completamente aleatória como os elementos são selecionados, não garante de forma alguma que os indivíduos selecionados sejam os melhores, o que se reflete no funcionamento desajustado do grupo eletrobomba.

Como se comprova pelos gráficos do caudal das rotinas *GRouletteWheel*, *GTournamentSelector* e *GUniformSelector*, o número de arranques é bastante superior ao observado nas simulações anteriores, para além de que os valores de custo específico também se demonstram consideravelmente mais elevados do que na rotina *GRankSelector*. Por estes motivos esta última é a rotina considerada para as simulações seguintes.

- **Crossover:** Relativamente à função de cruzamento, foram testadas as rotinas *G1DBinaryStringXSinglePoint*, *G1DBinaryStringXTwoPoint* e *G1DBinaryStringXUniform*, cujos resultados são apresentados nos gráficos da Figura 4.43 à Figura 4.48.

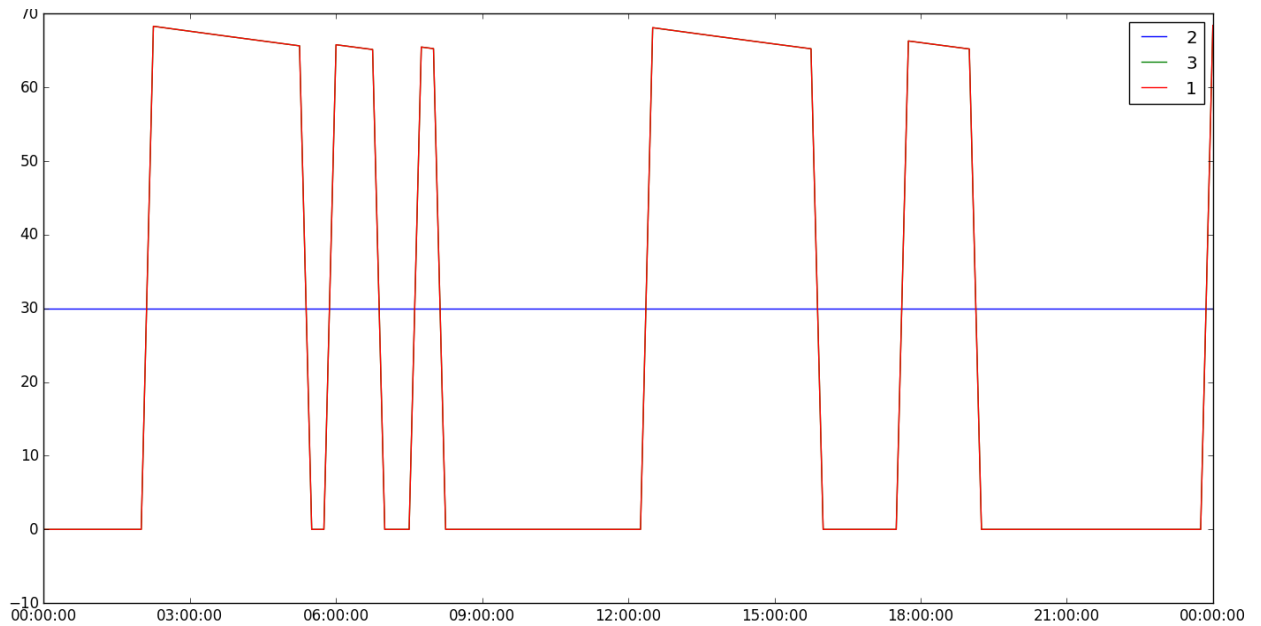


Figura 4.43 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringXSinglePoint*

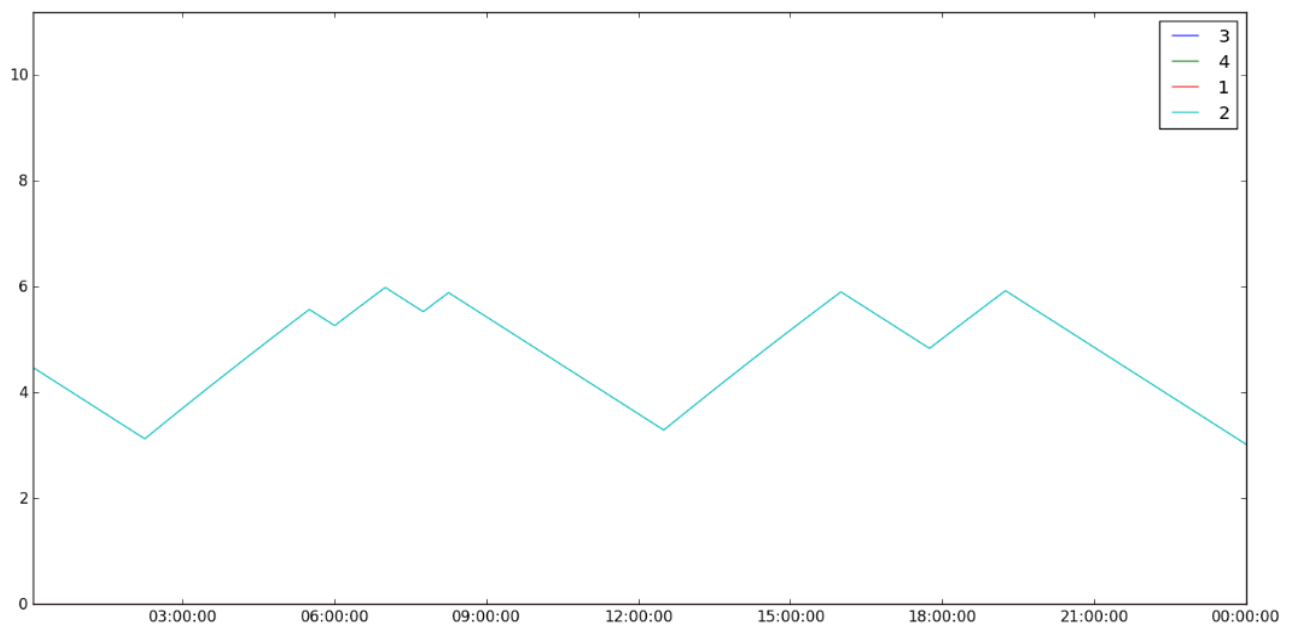


Figura 4.44 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringXSinglePoint*

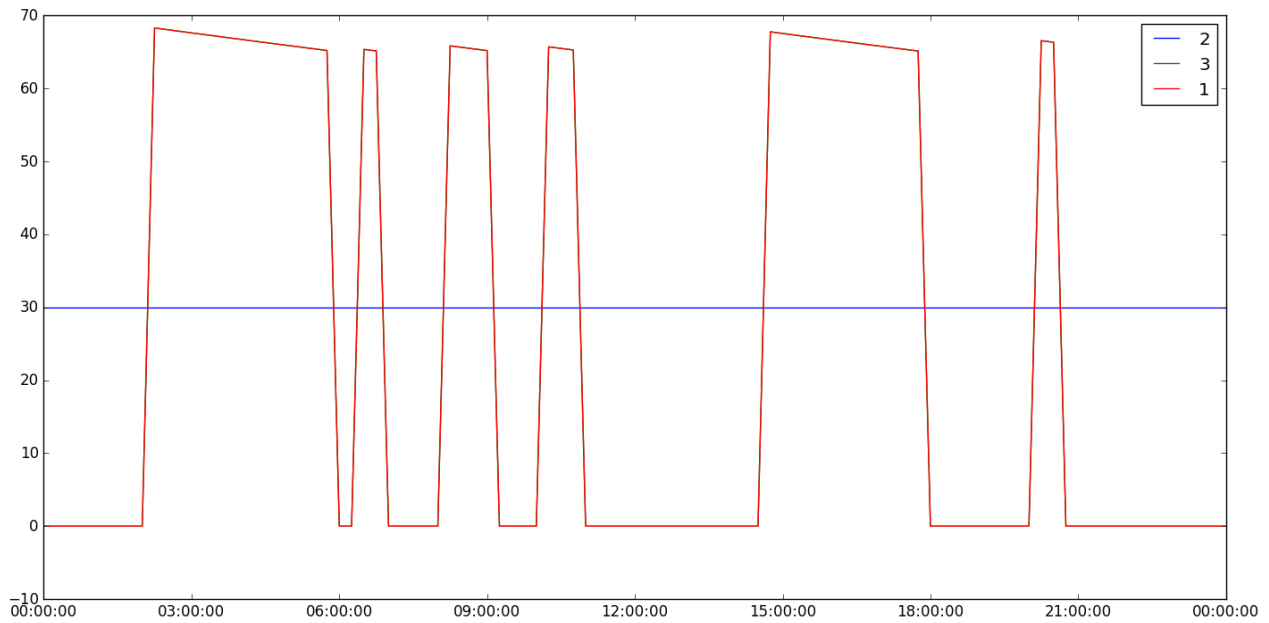


Figura 4.45 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringXTwoPoint*

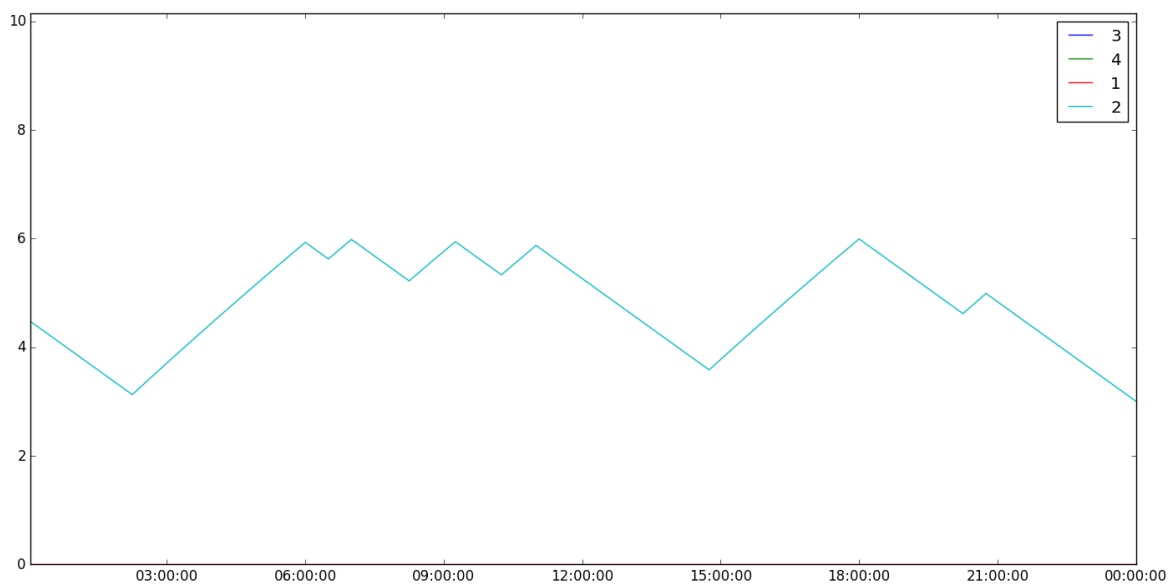


Figura 4.46 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringXTwoPoint*

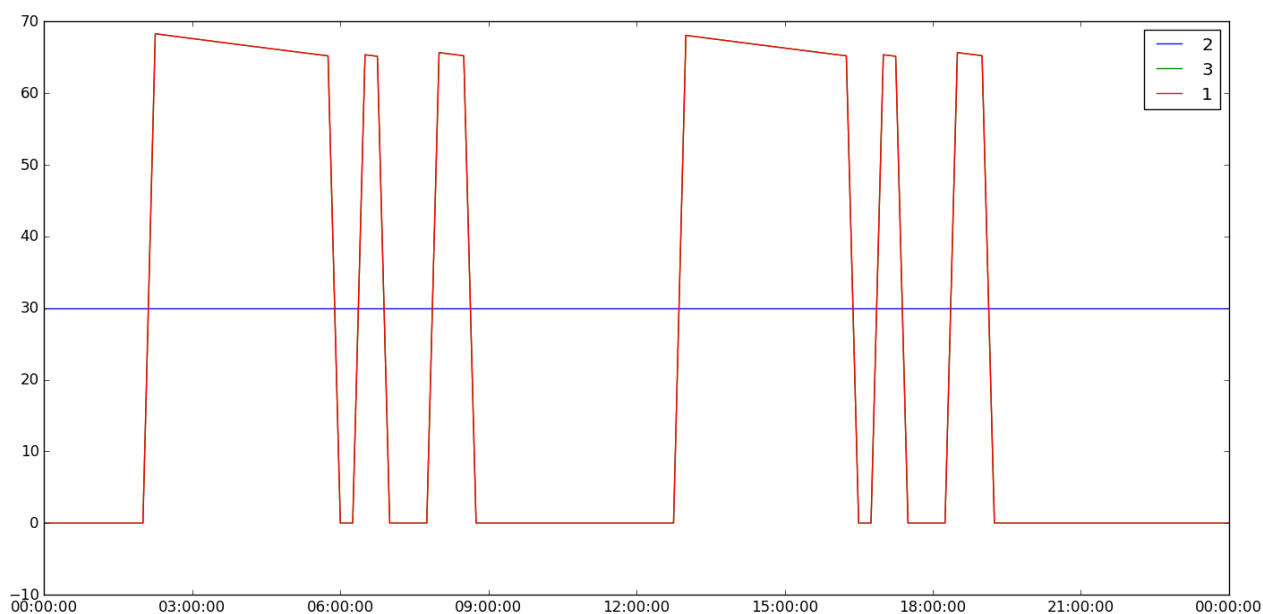


Figura 4.47 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringXUniform*

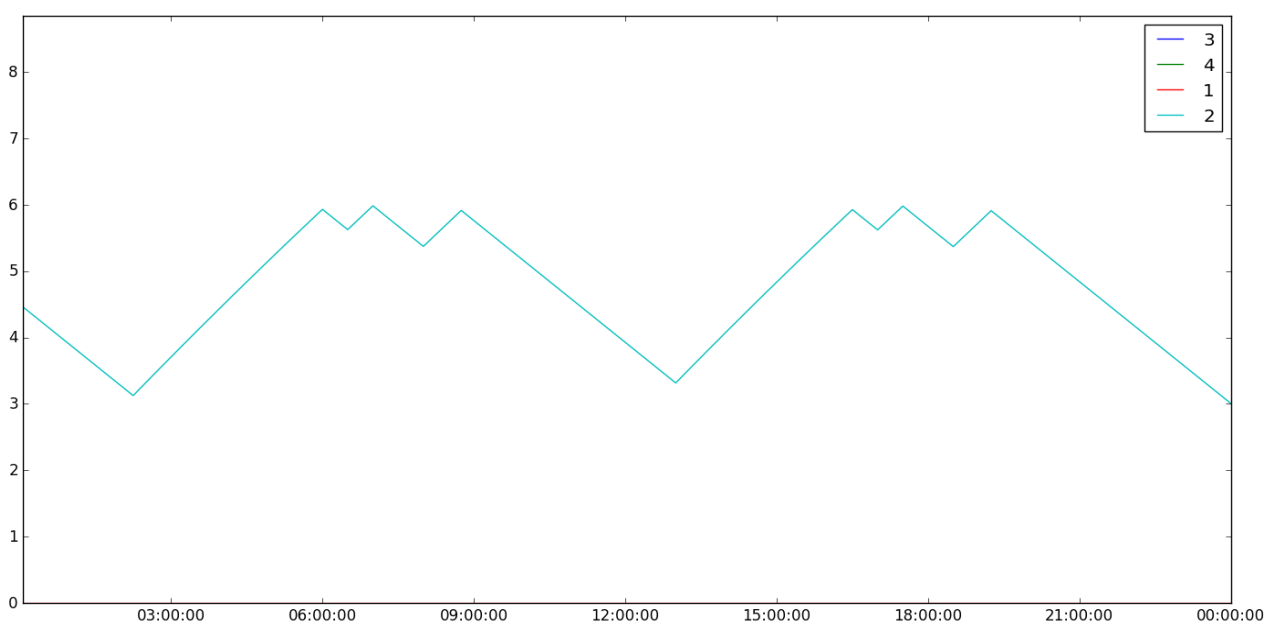


Figura 4.48 - - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *G1DBinaryStringXUniform*

O custo específico para cada uma destas simulações é apresentado na Tabela 4.9

Tabela 4.9 - Custo específico resultado das simulações

Operador	Custo (€/m ³)
<i>G1DBinaryStringXSinglePoint</i>	0.02270
<i>G1DBinaryStringXTwoPoint</i>	0.02278
<i>G1DBinaryStringXUniform</i>	0.02293

Considerando que a rotina *G1DBinaryStringXSinglePoint* utiliza como forma de cruzamento copiar do primeiro progenitor desde o início do cromossoma até a um ponto definido e o restante é copiado do seguinte cromossoma, os resultados obtidos desta rotina são bastante mais homogêneos do que quando comparados com a rotina que utiliza dois pontos de cruzamento (*G1DBinaryStringXTwoPoint*). Estes resultados são traduzidos pelo funcionamento do grupo, que na primeira rotina evidencia ser bastante mais coerente do que utilizando a segunda, salientando que nesta segunda rotina o grupo apresenta um arranque durante a hora com tarifa mais cara, o que reflete que o cruzamento utilizando dois pontos aumenta a probabilidade de se originarem indivíduos menos capazes. Comparando a primeira rotina à *G1DBinaryStringXUniform*, não se observa, ao nível de funcionamento do grupo, grandes alterações, mas a forma aleatória como é feito o cruzamento também pode prejudicar a solução final uma vez que o custo específico resultante da utilização desta rotina é claramente superior.

Considerando os resultados obtidos, a rotina selecionada para continuar a evolução do Algoritmo foi *G1DBinaryStringXSinglePoint*, tanto por originar o custo específico mais baixo, como por de todas as simulações ser a que representa um menor número de arranques do grupo.

Em cada simulação foram analisados não só os valores do custo específico, mas também o comportamento do grupo eletrobomba e consequentes níveis de água no reservatório. Fazendo uma análise global, é possível concluir que a combinação de operadores que origina uma solução mais vantajosa é apresentada na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Combinação de operadores a considerar

Operador	Custo (€/m ³)
G1DBinaryStringInitializer GRankSelector G1DBinaryStringXSinglePoint G1DListMutatorIntegerBinary	0.02265

Nas Figura 4.49 e Figura 4.50 são apresentados os gráficos resultantes dos operadores selecionados para a evolução do Algoritmo.

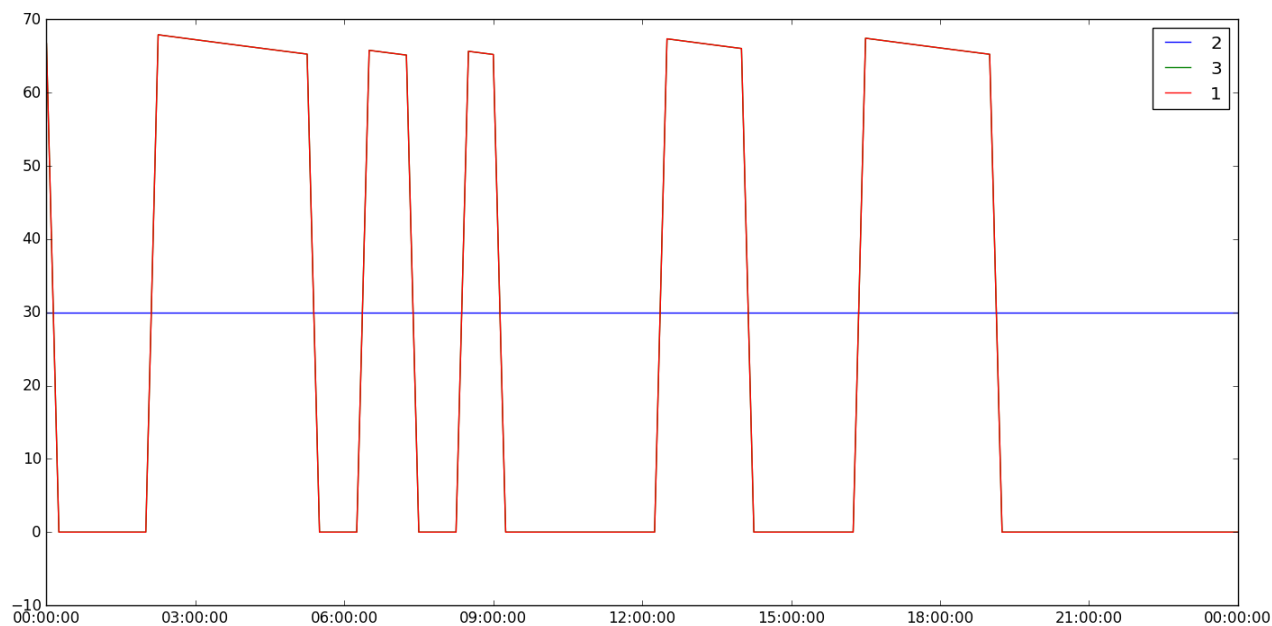


Figura 4.49 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para os operadores seleccionados.

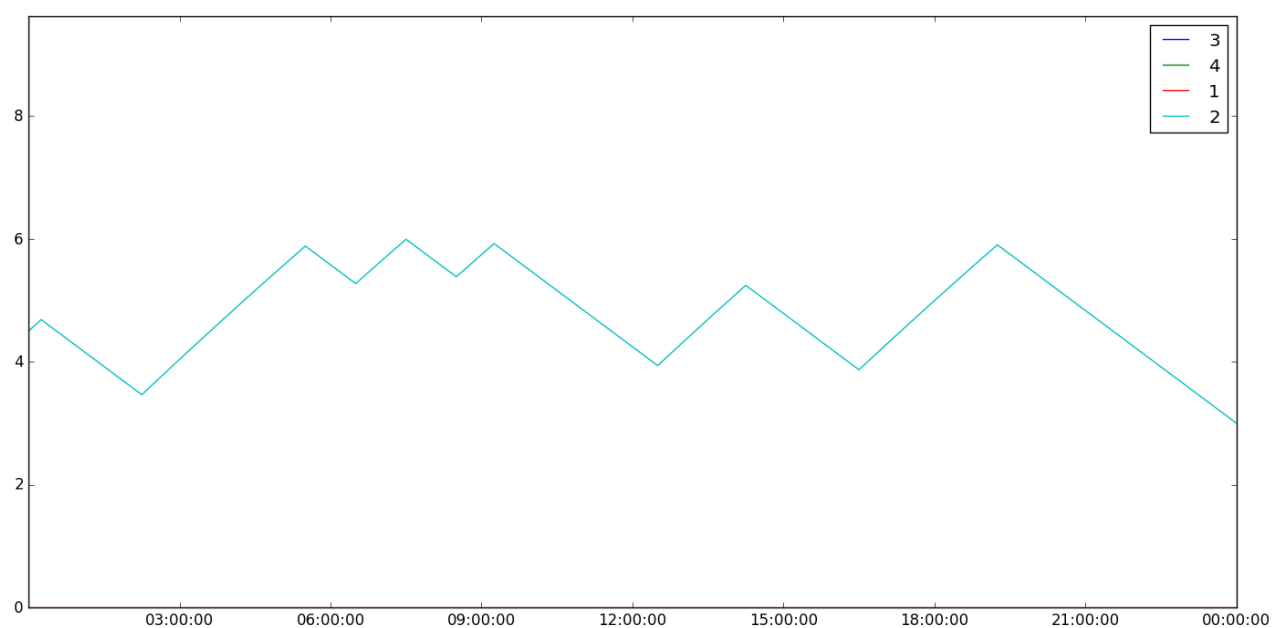


Figura 4.50 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para os operadores seleccionados

Fazendo uma análise do resultado da simulação relativamente ao comportamento do sistema, é possível observar, com recurso aos gráficos apresentados anteriormente, que o nível de água no reservatório respeita sempre os valores máximos e mínimos, sendo que o grupo arranca sempre antes de este atingir o nível mínimo para aproveitar o melhor rendimento do grupo para níveis mais elevados. Durante a hora de vazio, o nível do reservatório tenta manter-se sempre próximo do valor máximo para rentabilizar ao

máximo o facto do grupo estar a trabalhar durante o horário de tarifa mais reduzida. Durante as horas de ponta o grupo está sempre desligado, economizando assim bastante energia para utilizar durante o período de cheia (a partir das 16h), enchendo assim o mais possível o reservatório para que desligue novamente a partir das 19h e consiga satisfazer os consumos, terminando com o nível mínimo de água no reservatório.

4.5.2.3 Crossover rate e Mutator rate

Uma vez encontrados os operadores mais vantajosos a utilizar no exemplo em questão, foram efetuadas simulações para tentar otimizar os resultados obtidos com estes operadores. A forma escolhida para esta otimização foi alterar as percentagens de cruzamento e mutação. Segundo Obitko (1998), a percentagem de cruzamento deve estar entre 80% e 95% e a de mutação entre 0.5% e 1%. Da Figura 4.51 à Figura 4.58 são apresentados os resultados das simulações realizadas alterando estes valores percentuais.

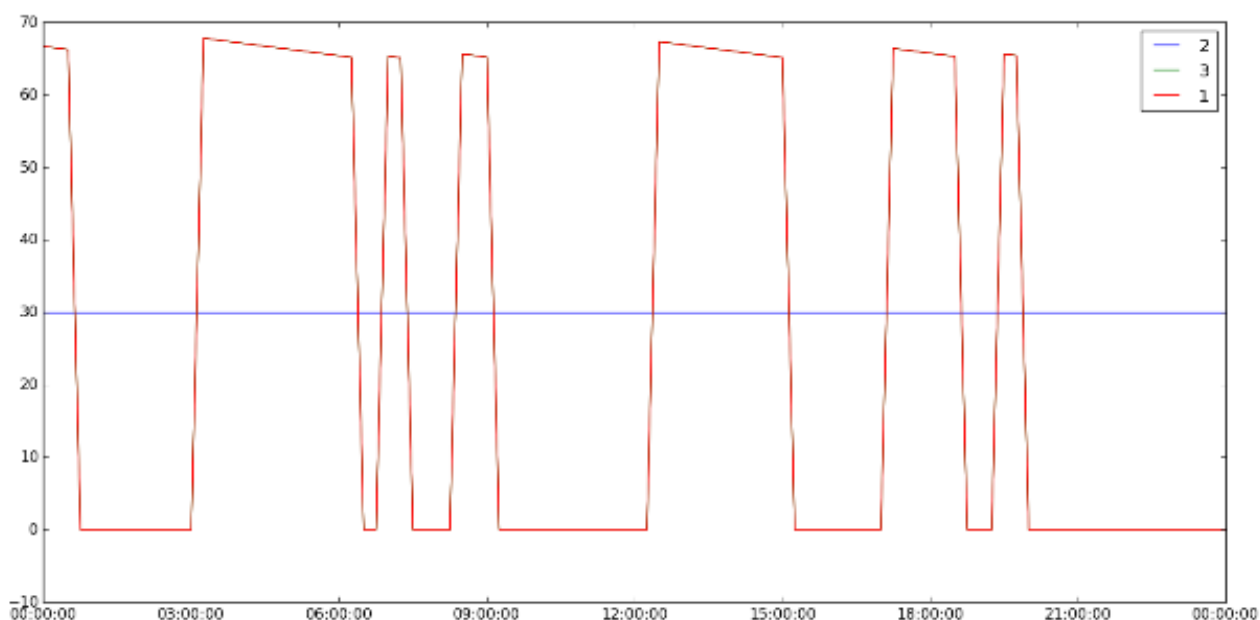


Figura 4.51 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 90 % e Mutação de 3%

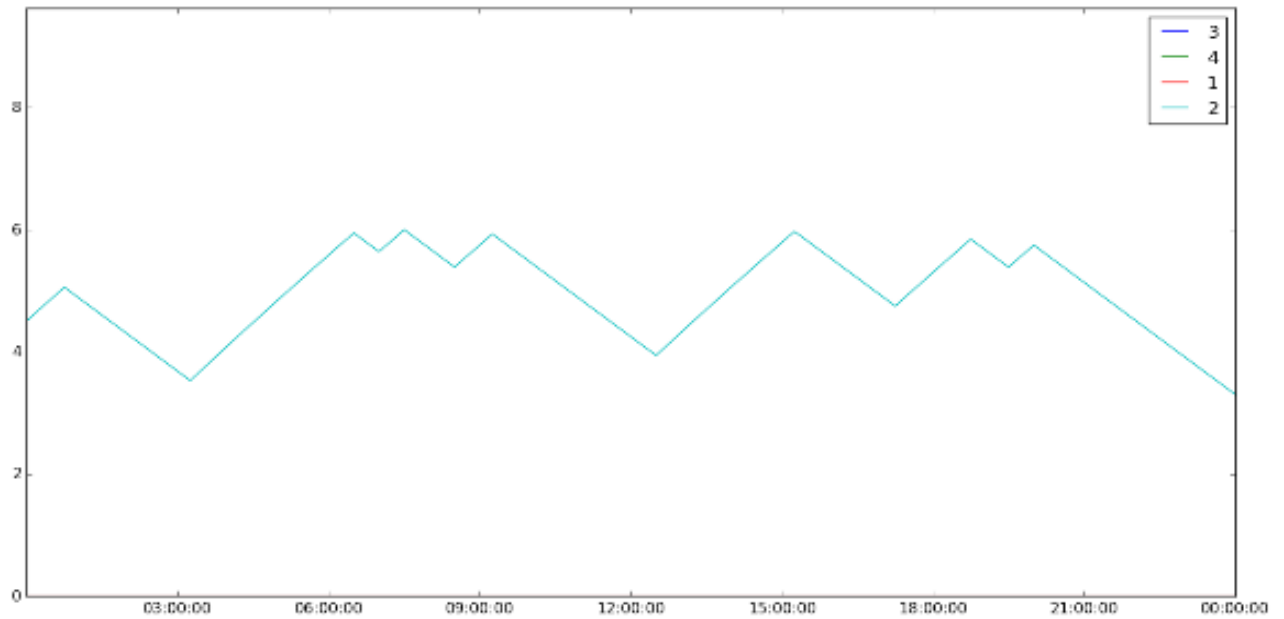


Figura 4.52 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 90 % e Mutação de 3%

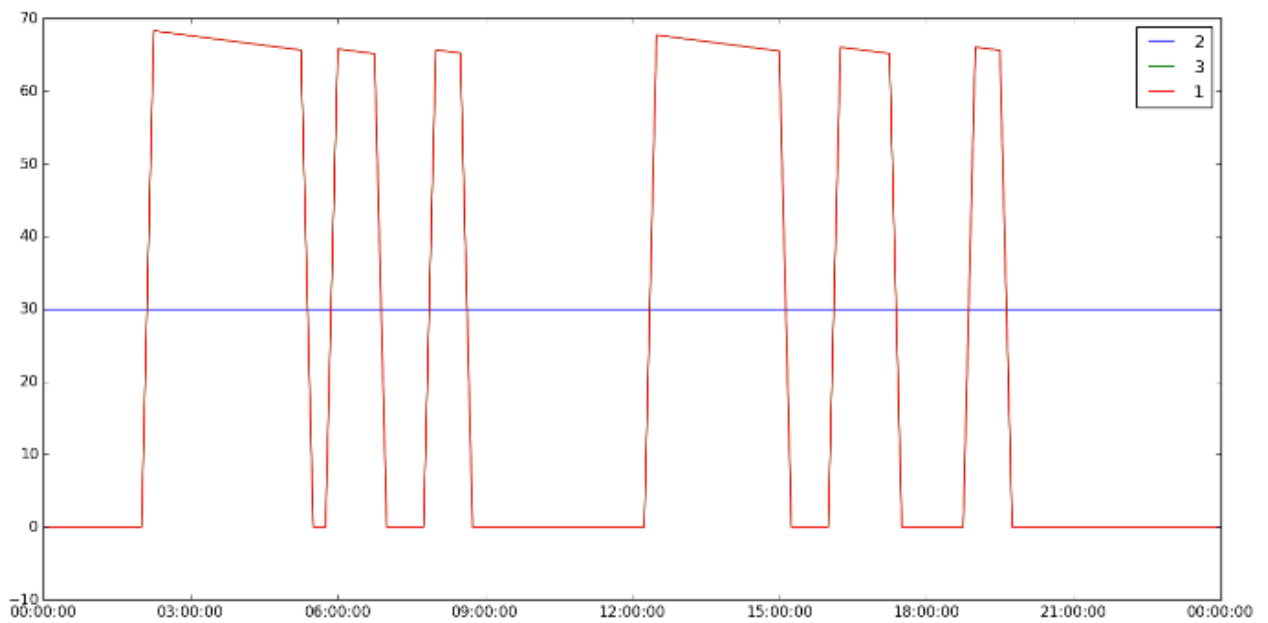


Figura 4.53 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 90 % e Mutação de 1%

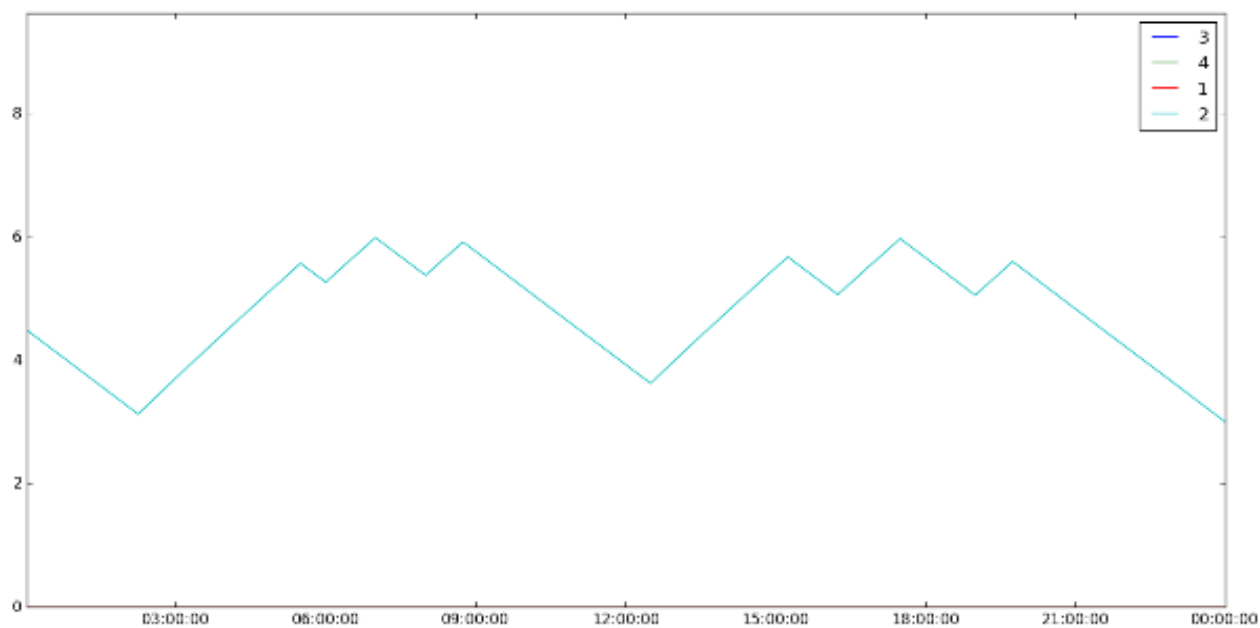


Figura 4.54 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 90 % e Mutação de 1%

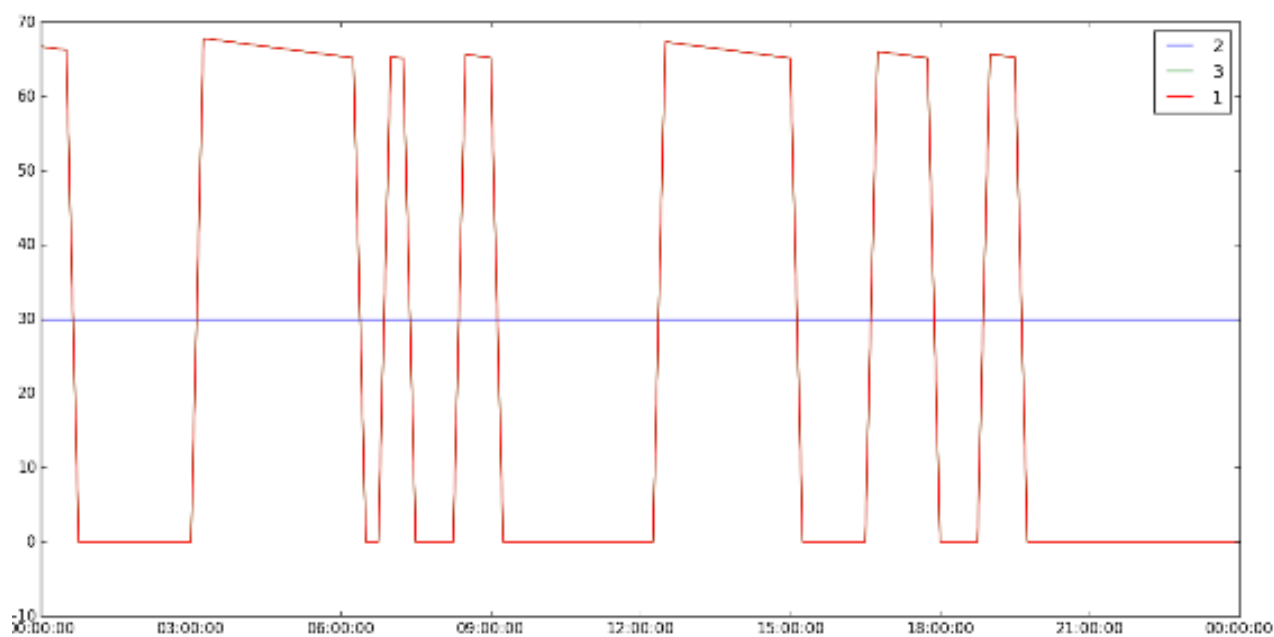


Figura 4.55 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 80 % e Mutação de 1%

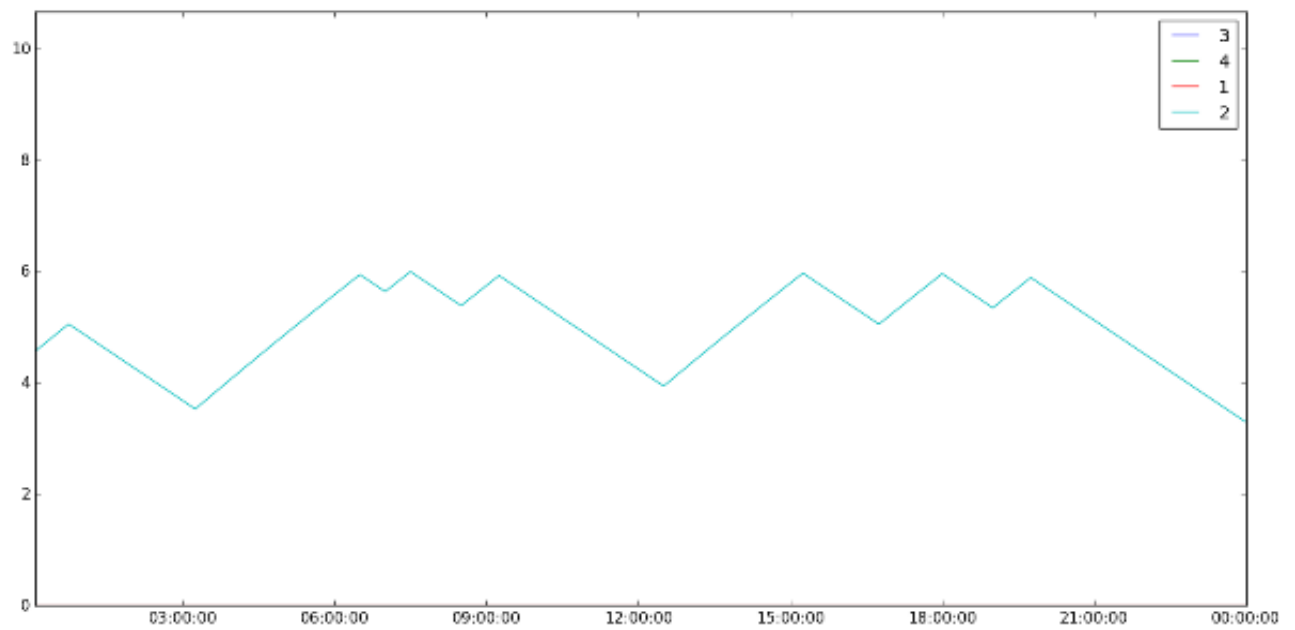


Figura 4.56 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 80 % e Mutação de 1%

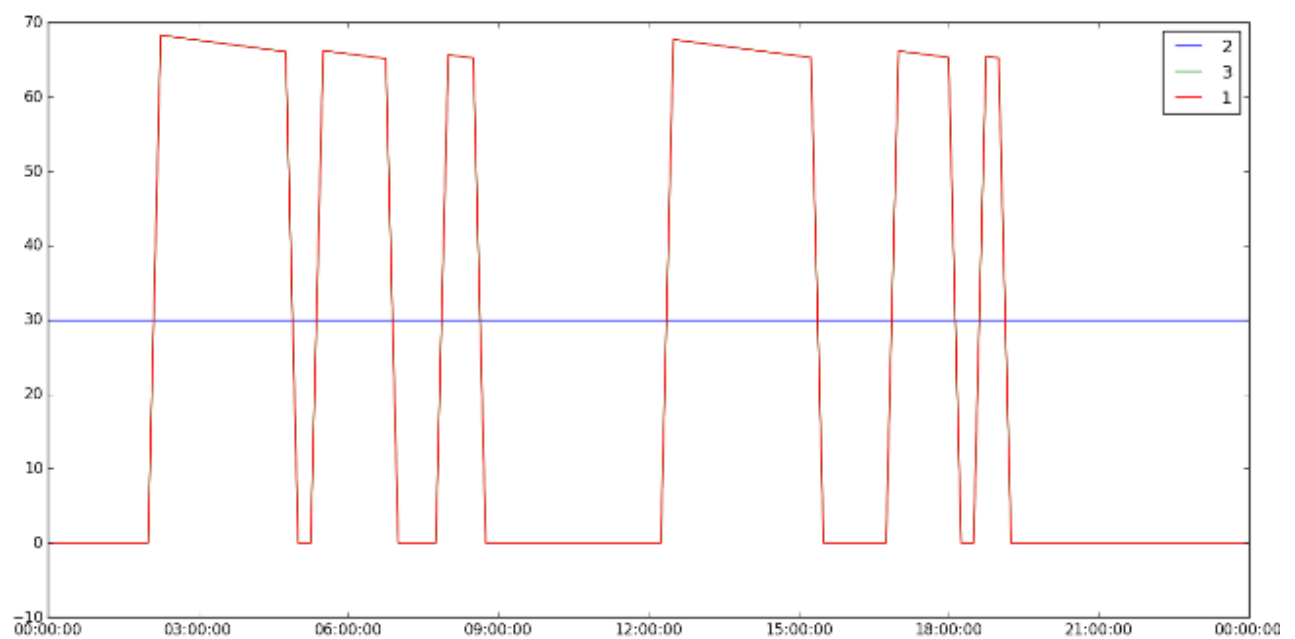


Figura 4.57 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 95 % e Mutação de 1%

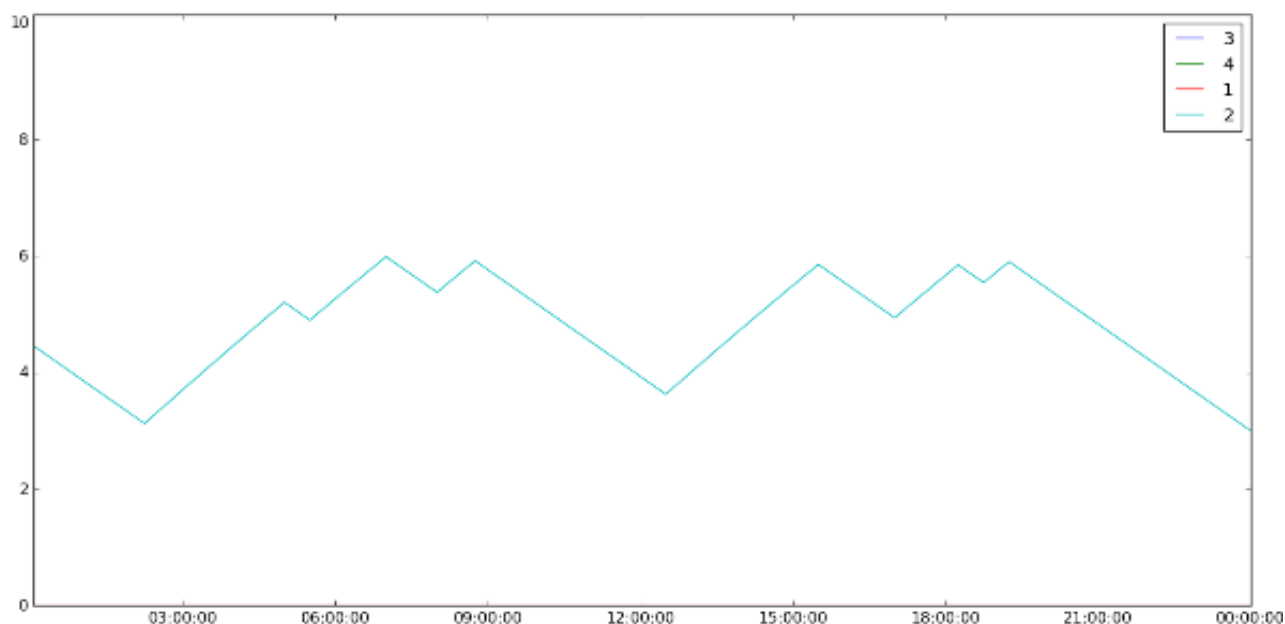


Figura 4.58 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para uma percentagem de cruzamento de 95 % e Mutação de 1%

O custo específico, em €/m³ que resultou de cada uma destas análises é descrito na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Custo específico resultado de cada análise

Percentagens utilizadas	Custo (€/m3)
Cruzamento – 90 % Mutação – 3%	0.02288
Cruzamento – 90% Mutação -1 %	0.02280
Cruzamento – 80% Mutação -1%	0.02285
Cruzamento – 95% Mutação -1%	0.02272

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que diminuir a percentagem de cruzamento e aumentado a percentagem de muta o reflete-se em resultados com um custo específico maior e um maior número de arranques, relativamente ao funcionamento do grupo. Uma percentagem de cruzamento menor corresponde a uma menor cria o de novos indivíduos, sendo a restante percentagem de indivíduos da popula o obtida por sele o dos melhores indivíduos da popula o anterior, enquanto que uma percentagem de muta o maior significa introduzir uma maior diversidade dos novos indivíduos o que pode levar o algoritmo a evoluir de uma forma mais lenta e com mais dificuldade em convergir. Assim sendo,   mais vantajoso para a evolu o do Algoritmo uma percentagem de cruzamento quanto maior possível e uma percentagem de muta o o menor possível, embora mantendo sempre um mínimo para

introdução de maior diversidade de soluções e minimizar a possibilidade de o algoritmo ficar estabilizado num mínimo local e não haver a procura da melhor solução possível.

4.5.2.4 Função Fitness

A função *fitness* é considerada um tipo particular de função objetivo, que avalia os indivíduos que constituem o Algoritmo e lhes atribui um valor de aptidão, ou seja, avalia quão próximos os indivíduos estão de serem considerados uma solução aceitável para a evolução do algoritmo.

Desta avaliação resulta um valor de *fitness score*, que é calculado através de um ajuste do *raw score* (valor de *score* normal, no caso, o custo específico da simulação). Este ajuste é feito recorrendo a um outro operador genético denominado *Scaling*. Tal como os outros operadores, o *Scaling* também está associado a diferentes rotinas para melhor se adequar a todos os casos.

- **BoltzmannScaling:** utiliza a exponenciação para ajustar o valor de *fitness*, considerando o valor da temperatura. (Yu e Gen, 2010)

$$f'_i = e^{\frac{f_i}{t}} \quad (4.1)$$

Onde:

f'_i - valor de *fitness* atribuído ao indivíduo *i*, depois do *scaling*

f_i - valor de *fitness* atribuído ao indivíduo *i*, antes do *scaling*

t - temperatura

Esta função pretende introduzir o componente de um valor de temperatura, previamente definido, que condiciona o valor de *fitness*.

- **ExponentialScaling:** o valor de *fitness* será o exponencial do valor de *raw score*:

$$f'_i = e^{f_i} \quad (4.2)$$

- **LinearScaling:** altera o valor de *fitness* de cada indivíduo através de uma forma linear:

$$f'_i = a \times f_i + b \quad (4.3)$$

Sendo que os valores de a e b dependem de condições definidas pelo algoritmo.

- **PowerLawScaling:** implementa o *Scaling* como forma de potência:

$$f'_i = f_i^k \quad (4.4)$$

Sendo k um valor de controlo.

- **SaturatedScaling**: o valor de *fitness* é calculado através de:

$$f'_i = 1,0 - e^{f_i} \quad (4.5)$$

- **SigmaTruncScaling**: método linear que considera o desvio padrão da população atual e calcula o valor de *fitness* através de:

$$f'_i = f_i - (f_{avg} - c \times \sigma) \quad (4.6)$$

Onde:

F_{avg} - valor médio de *fitness*

C – parâmetro de controlo (inteiro)

σ – desvio padrão da população

Tendo em conta que a alteração destas rotinas influencia diretamente o valor de *fitness* e consequentemente o valor de score, considerou-se relevante efetuar uma análise semelhante à que foi feita com os restantes operadores genéticos, tendo por base os que foram selecionados para a evolução do algoritmo. Para esta análise considerou-se uma população de 500 indivíduos e 500 gerações, unicamente por o tempo computacional despendido ser mais razoável do que utilizando a dimensão de população que se utilizou na análise anterior. Da Figura 4.59 à Figura 4.70 são apresentados os resultados das diferentes simulações realizadas, para cada rotina acima mencionada.

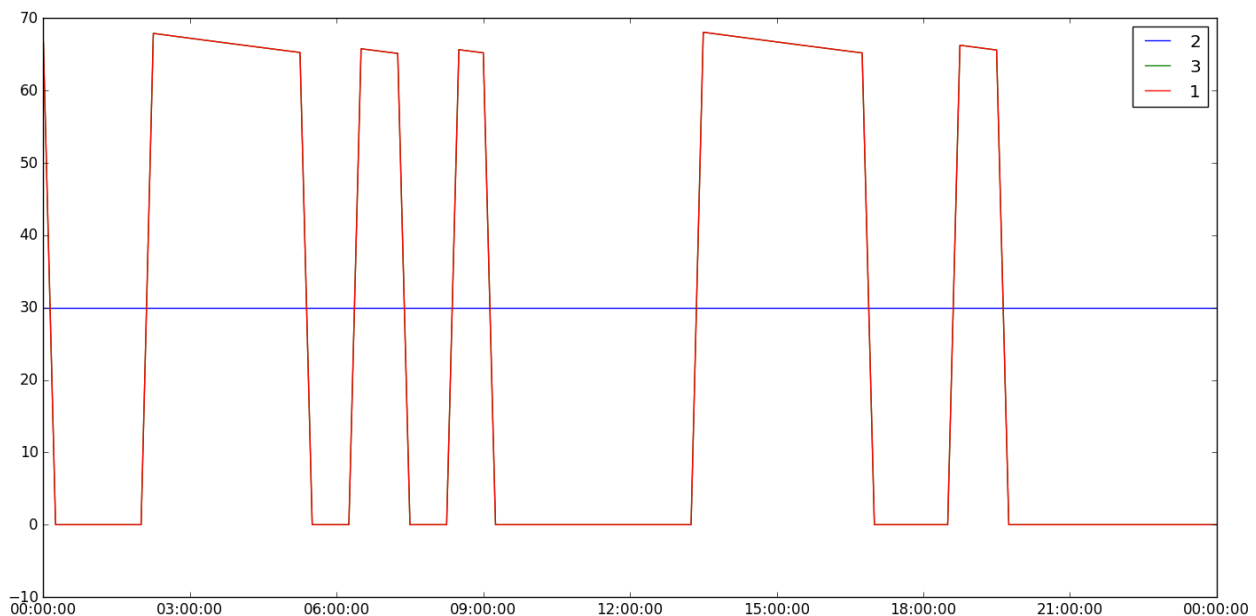


Figura 4.59 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *LinearScaling*.

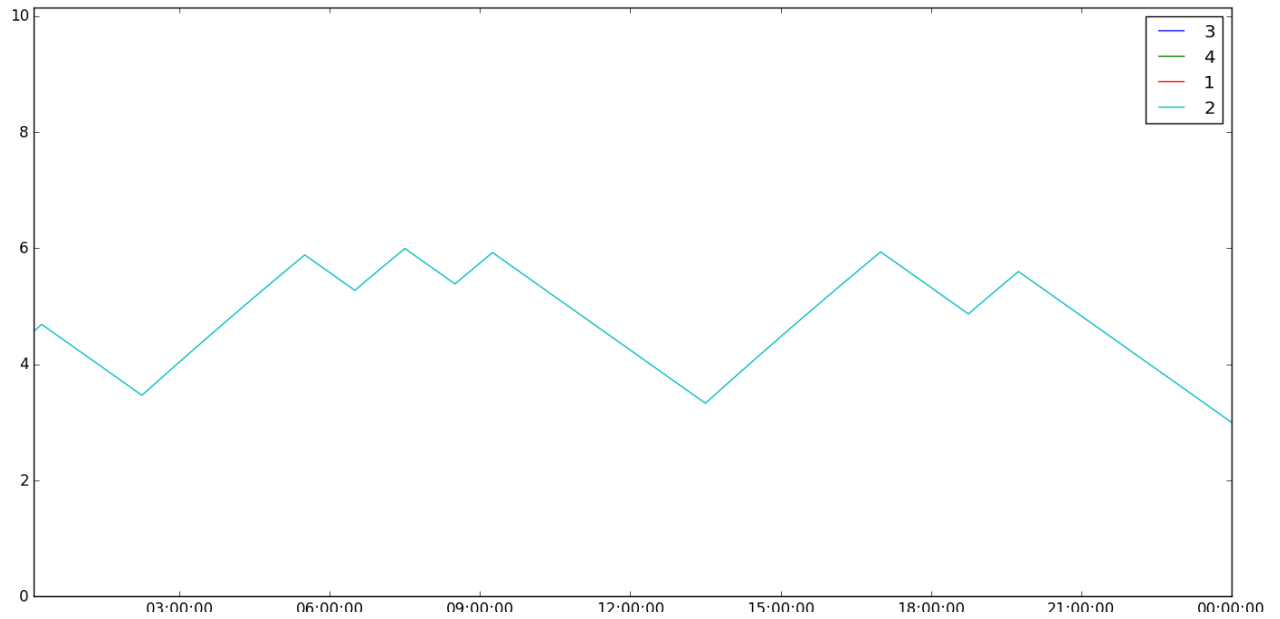


Figura 4.60 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *LinearScaling*

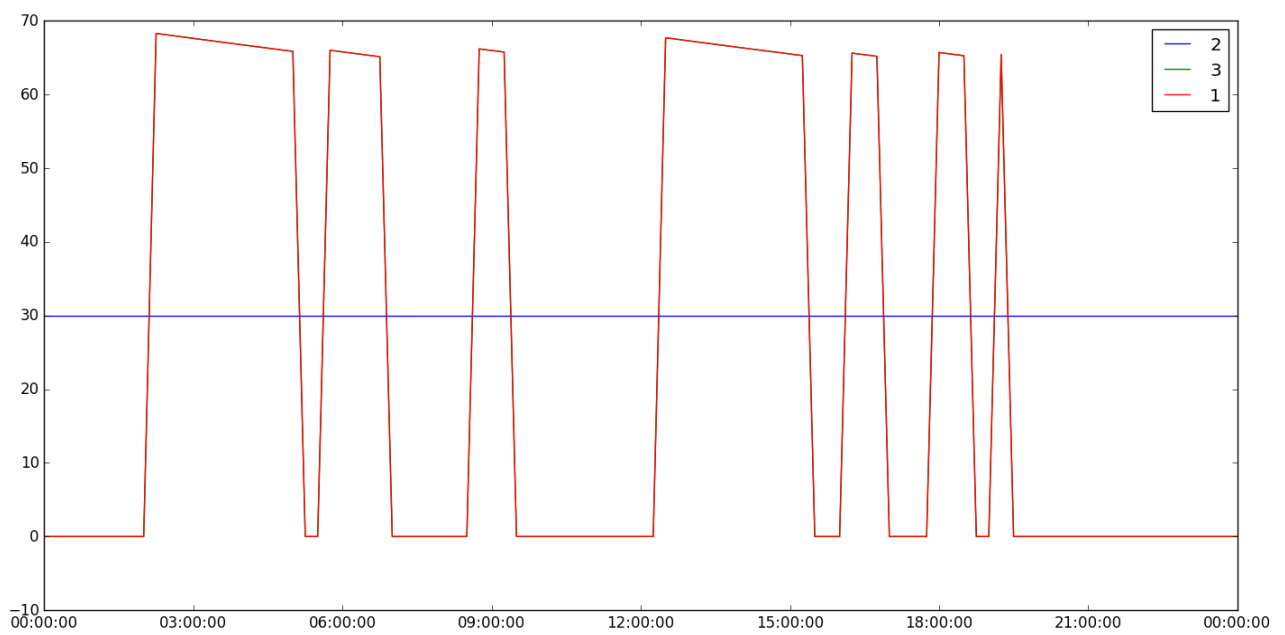


Figura 4.61 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *BoltzmannScaling*.

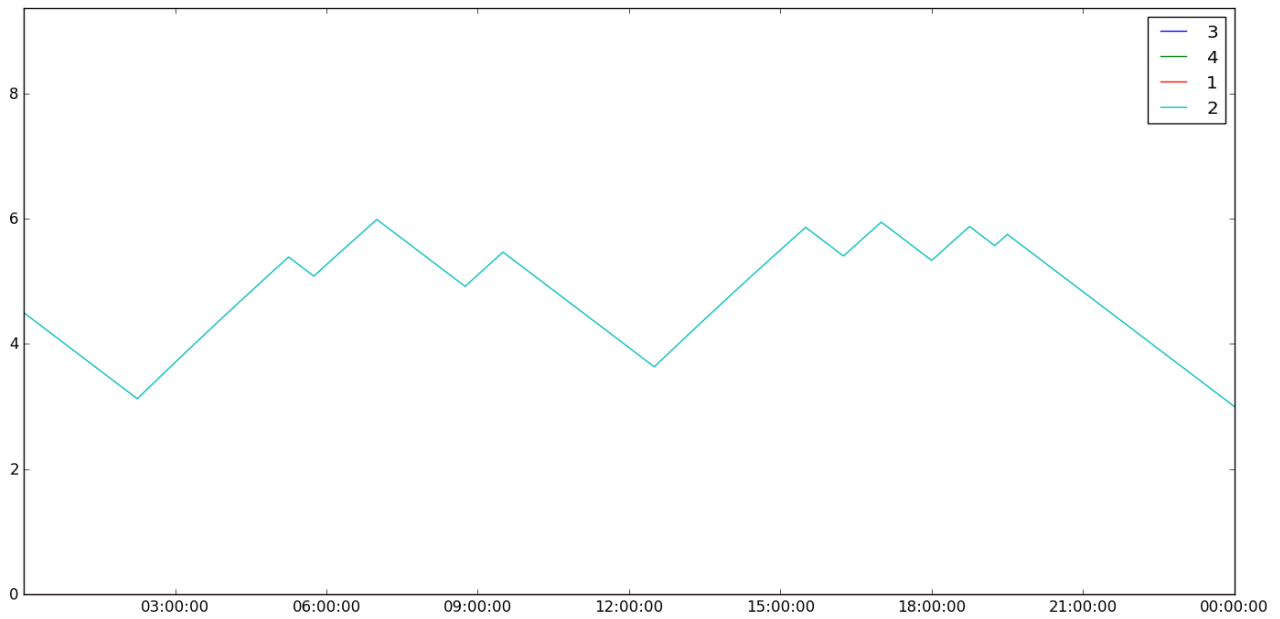


Figura 4.62 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *BoltzmannScaling*

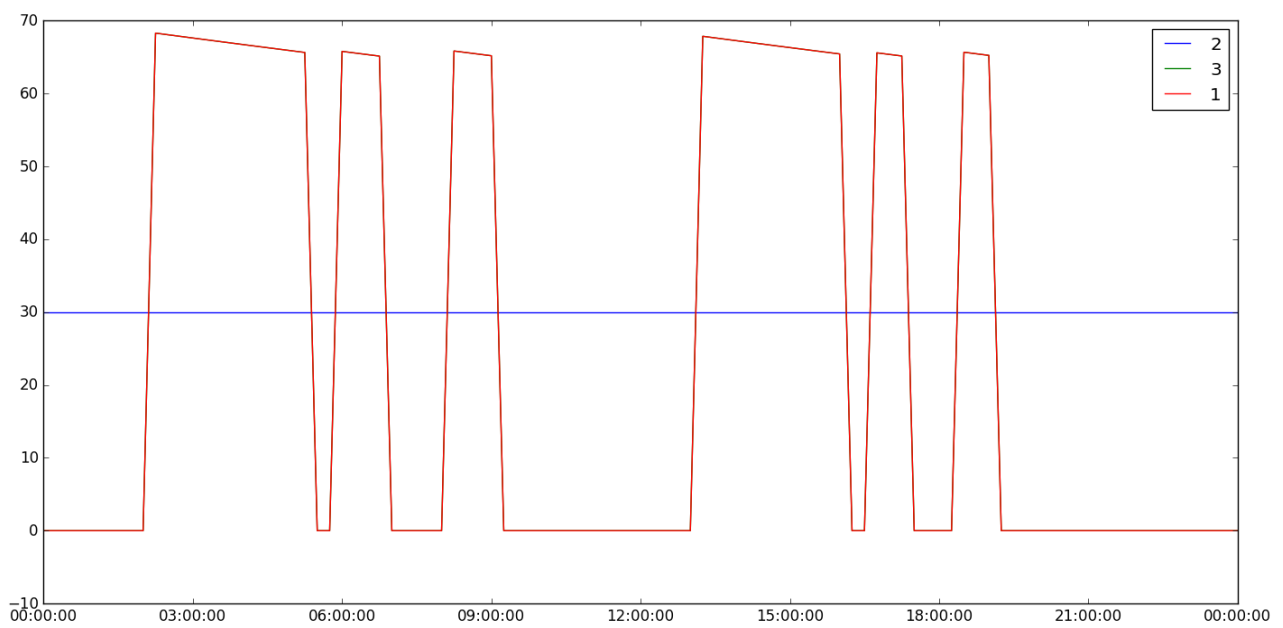


Figura 4.63 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *ExponentialScaling*

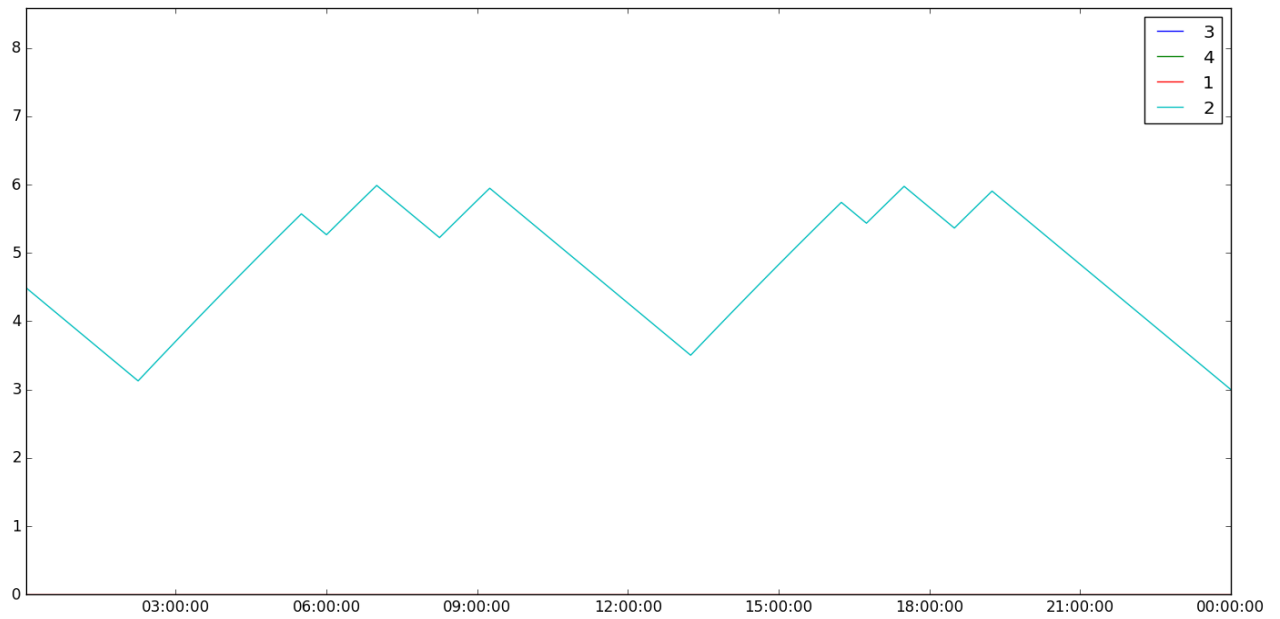


Figura 4.64 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *ExponentialScaling*

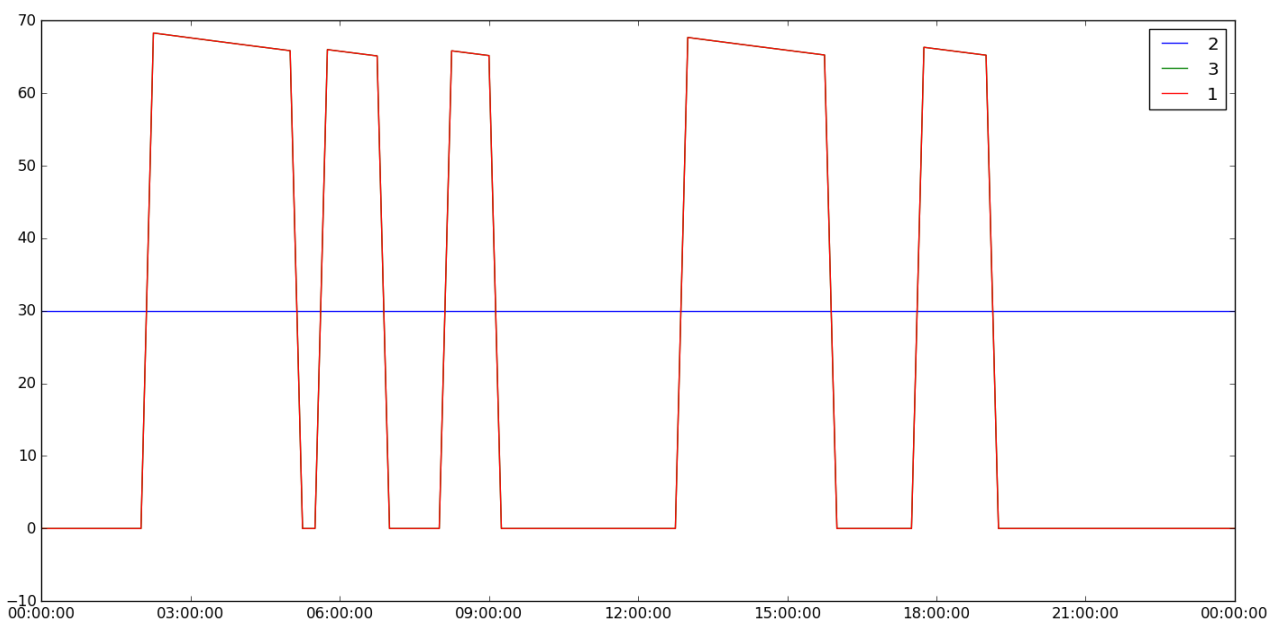


Figura 4.65 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *PowerLawScaling*

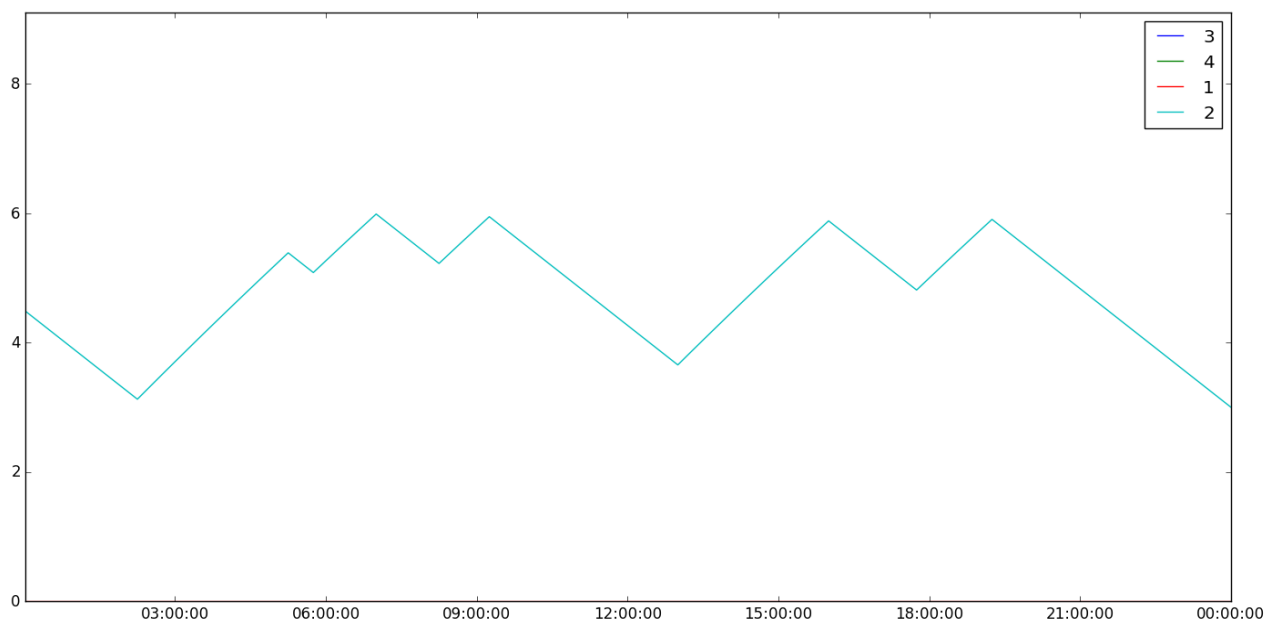


Figura 4.66 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *PowerLawScaling*

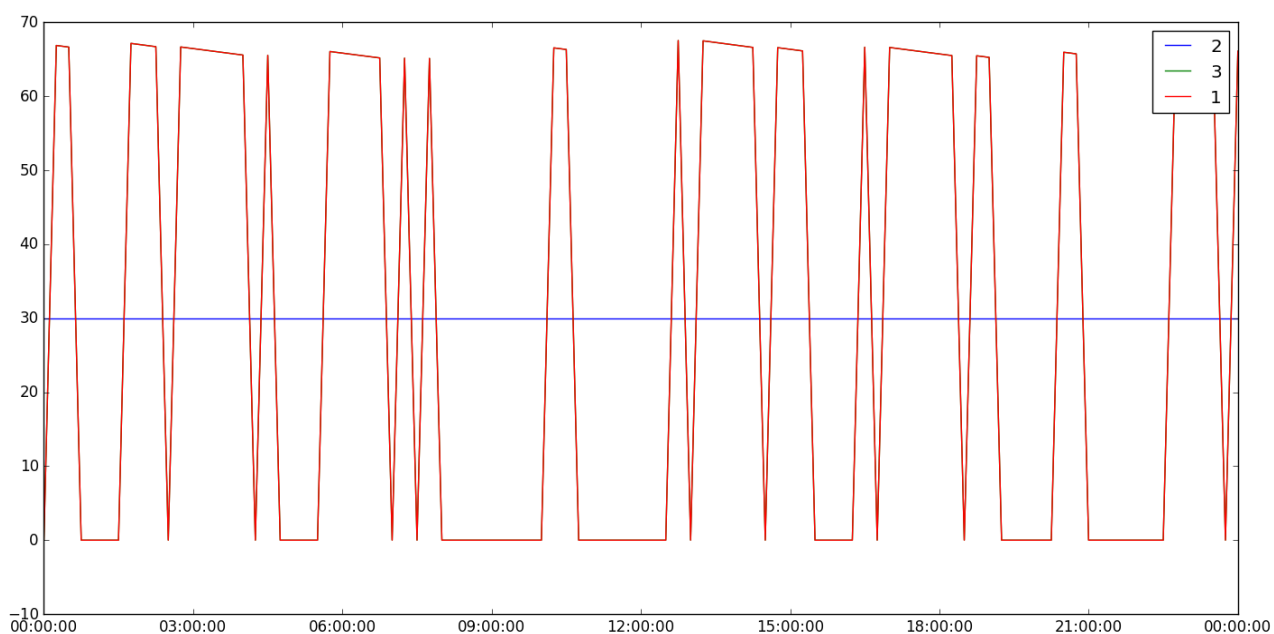


Figura 4.67 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *SaturatedScaling*

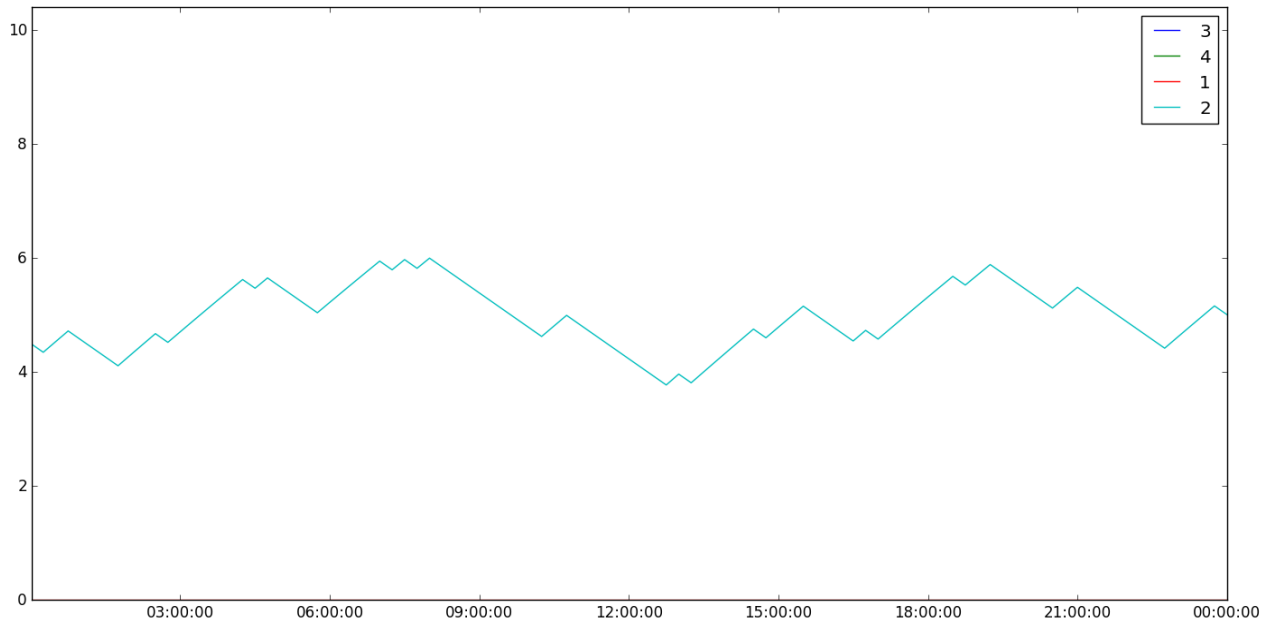


Figura 4.68 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *SaturatedScaling*

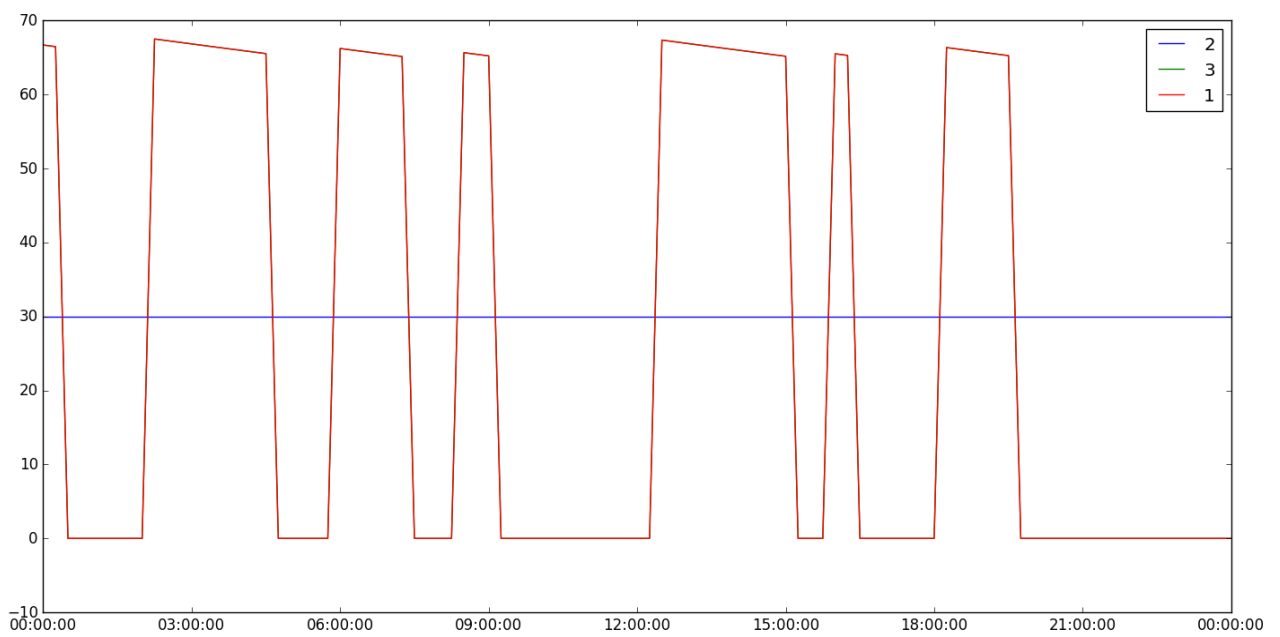


Figura 4.69 - Caudal da bomba, em l/s (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *SigmaTruncScaling*

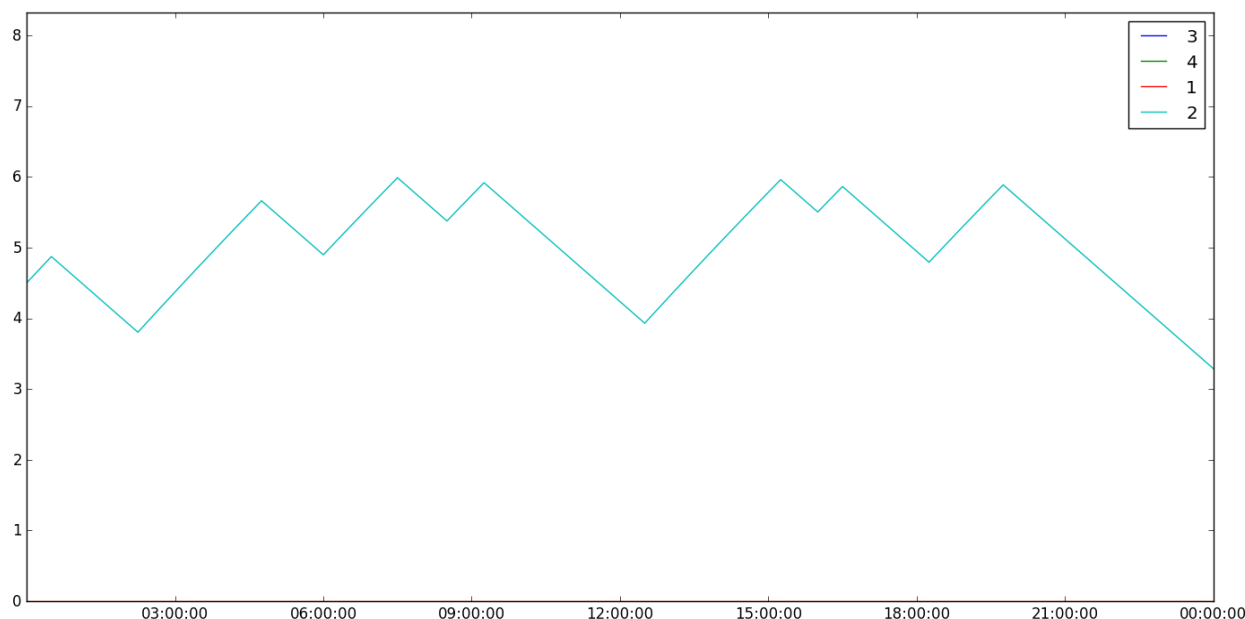


Figura 4.70 - Nível de água no reservatório, em metros (eixo das ordenadas), ao longo da simulação (24h), para *SigmaTruncScaling*

O custo específico para cada uma destas simulações é apresentado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Custo específico resultado das simulações

Operador	Custo (€/m ³)
<i>LinearScaling</i>	0.02265
<i>BoltzmannScaling</i>	0.02293
<i>ExponentialScaling</i>	0.02275
<i>PowerLawScaling</i>	0.00225
<i>SaturatedScaling</i>	0.02523
<i>SigmaTruncScaling</i>	0.02291

Uma vez que a rotina *LinearScaling* calcula o valor de *fitness* utilizando uma função linear, os resultados obtidos com a utilização desta rotina são satisfatórios, não existindo discrepâncias no funcionamento do grupo. A rotina *BoltzmannScaling* está mais direcionada para utilizar em exemplos que de certa forma dependam da temperatura, mas de todas as formas resulta em valores de *fitness* que não prejudicam em demasia o funcionamento do grupo. O cálculo do valor de *fitness* pela rotina *ExponentialScaling* resulta num funcionamento aceitável do grupo eletrobomba, uma vez que a relação entre os valores de aptidão dos cromossomos e os valores de score é feita de forma exponencial. Os níveis do reservatório resultantes da utilização desta rotina tendem a criar um padrão ao longo da simulação. A rotina *PowerLawScaling* é a que apresenta os melhores resultados visto que o valor de *fitness* é calculado elevando o valor de *score* à potência de uma constante, que por defeito o valor desta constante é 1,0005, o que torna os valores de

score e de *fitness* muito próximos. Os resultados menos aceitáveis das restantes duas rotinas, podem ser explicadas da forma como são calculados os valores de *fitness*. Na rotina *SaturatedScaling*, o valor de *fitness* está a ser diminuído face ao valor de *score*, podendo até resultar em valores de *fitness* negativos, o que condiciona em muito a avaliação que é feita dos cromossomas. Já na rotina *SigmaTruncScaling*, o cálculo do valor de *fitness* é feito tendo em consideração o do valor do desvio padrão, o que pode fazer diminuir o valor de aptidão e consequentemente prejudicar a evolução do Algoritmo, refletindo-se em resultados pouco vantajosos comparativamente com o que foi obtido utilizando outras rotinas.

Analisando os resultados obtidos pelas várias simulações conclui-se que o valor de custo específico mais baixo corresponde também ao menor número de arranques do grupo eletrobomba. Esta situação corresponde à rotina *PowerLawScaling*. Com base nesta análise é possível concluir que o valor de *fitness score* interfere diretamente na forma como o Algoritmo evolui para a solução ideal e que não é necessário um número tão elevado de gerações e de indivíduos em cada população para obter um funcionamento aceitável do grupo.

4.5.3 Critérios de Paragem

Para determinar quando o Algoritmo termina a evolução, podem ser definidos critérios de paragem (*Termination Criteria*) que podem diminuir o tempo computacional, ou simplesmente podem ser utilizados sempre que se desejar que o Algoritmo não ultrapasse um determinado critério. Tal como os operadores genéticos, aos critérios de paragem estão associados as seguintes rotinas:

- a) **RawScoreCriteria:** termina a evolução quando o resultado pretendido for atingido. Este valor é definido pelo utilizador e o Algoritmo termina a evolução quando encontra uma solução que satisfaça este valor.
- b) **ConvergenceCriteria:** termina a evolução quando a população convergir, ou seja quando o primeiro indivíduo for igual ao penúltimo.
- c) **RawStatsCriteria:** termina a evolução quando o valor máximo de *score* for igual ao valor mínimo e o valor médio for igual ao valor máximo.
- d) **FitnessStatsCriteria:** termina a evolução quando o valor de *fitness* máximo for igual ao valor de mínimo e o valor de médio for igual ao valor máximo.

Tendo em conta o exemplo que se considera nesta análise, os critérios acima descritos nunca são atingidos, uma vez que a população acaba por manter sempre uma ampla diversidade de características de indivíduos (ver tópico 4.5.2.1). Como tal, para o caso em estudo, a melhor solução para tentar diminuir o tempo computacional e fazer com que o Algoritmo pare a evolução antes de terminar de avaliar todas

as gerações, seria conceber uma função que criasse esse critério de paragem. A função pode ser definida com base nas rotinas descritas anteriormente, como pode ser criada de raiz.

Para o exemplo de aplicação em estudo, a criação desta função não iria trazer resultados mais vantajosos do que os que foram apresentados anteriormente, uma vez que a penalização atribuída aos elementos do algoritmo caso não cumpram as condições do nível máximo e mínimo no reservatório é a atribuição de um score elevado, no caso 0,05. Assim sendo, o valor de score máximo é sempre conhecido o que condiciona por completo a criação de um critério que faça com que o algoritmo termine ao atingir determinado valor. Esta questão teria de ser posteriormente revista para que possa ser pensada e criada uma função que permita ao Algoritmo esta paragem, adequada ao caso em estudo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste último capítulo serão descritas as conclusões retiradas da análise realizada, assim como serão mencionados os desenvolvimentos futuros sugeridos para dar continuidade ao trabalho realizado.

5.1 CONCLUSÕES

A realização do estágio descrito neste relatório permitiu uma interação com *softwares* que não eram dominados, o que implicou uma grande pesquisa e trabalho para que fosse possível realizar a análise proposta, objetivo principal deste estágio. Desta pesquisa considera-se importante salientar a análise exaustiva que foi feita ao *package Pyevolve*, para perceber como eram aplicados os conceitos do Algoritmo Genético, explorando o funcionamento de cada operador genético e impacto dos mesmos nos resultados das diversas simulações que foram realizadas. Foi também estudado o Algoritmo utilizado e a forma como poderia ser adaptado a um problema de otimização de sistemas de abastecimento de água. Este processo de adaptação também foi parte relevante do estágio, uma vez que foram exploradas várias formas de o fazer, assim como permitiu sugerir novas funções de avaliação e apresentação dos resultados para o desenvolvimento da ferramenta a nível da empresa.

Por outro lado, foi também realizado um processo de *debug* que, apesar de não ter sido descrito ao nível do relatório, ocupou uma parte significativa do tempo de estágio e permitiu contribuir com correções e melhorias à ferramenta, como por exemplo no que toca à apresentação gráfica dos resultados, por forma a facilitar a interpretação dos resultados. À medida que a análise ia progredindo, foram surgindo aspetos que se considerou importante alterar e melhorar, daí ter sido um trabalho realizado em paralelo entre a empresa e o estagiário para culminar numa ferramenta que cumpre os principais objetivos que foram delineados, sendo importante ressaltar que ainda existem aspetos a melhorar que não foi possível em tempo útil abordar durante o período de estágio.

Não obstante, o desenvolvimento da ferramenta em estudo permitiu tomar conhecimento dos vários fatores que influenciam a eficiência energética de um sistema de abastecimento de água. A questão da otimização do sistema é a parte fundamental deste trabalho e com os resultados obtidos foi possível concluir que é possível utilizar o Algoritmo Genético como otimizador deste tipo de sistemas, uma vez que em todas as simulações que foram realizadas, o grupo eletrobomba encontra-se em estado *off* nas horas de ponta (períodos mais caros) e aproveita os períodos mais económicos para manter o reservatório

com um nível superior de forma a que fosse possível garantir as necessidades de consumo durante os períodos em que a bomba estivesse desligada, mas sem nunca ultrapassar o nível máximo, sendo esta uma restrição fundamental do problema.

Relativamente ao tempo de processamento da ferramenta, foi encontrada uma solução de número de indivíduos da população que originou um tempo de processamento um pouco elevado para as análises realizadas. Este tempo elevado pode ser devido ao facto de o Algoritmo não tenha sido capaz de atingir um critério de paragem que permitisse diminuir o tempo computacional.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com a finalização do estágio, entende-se que existem algumas características da ferramenta que poderiam ser exploradas:

- Alargar as simulações a períodos superiores a 24h
- Aplicar a ferramenta a casos de sistemas de abastecimento mais complexos
- Fazer alterações no passo de cálculo da ferramenta
- Estudar alternativas aos critérios de paragem atuais
- Estudar alternativas de penalização do Algoritmo para as restrições aos níveis do reservatório
- Explorar as demais potencialidades do Algoritmo Genético através do *Pyevolve*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁGUAS DO ALGARVE, S.A - Estação de Tratamento de Água de Tavira. [Consult. 31 Maio, 2016]. Disponível na <http://www.aguasdoalgarve.pt/content.php?c=59>.

BUNN, S. M. e WOOLEY, K. – “DERCETO: An on-Line Pump Schedule Optimisation System: NZWWA Annual Conference, New Zealand, 2001”. 43. New Zealand: New Zealand Water and Wastes Association, 2001

CEATI. - Variable Frequency Drives - Energy Efficiency Reference Guide 2009. [Consult. 31 Maio, 2016]. Disponível na http://www.ceati.com/freepublications/7025_guide_web.pdf.

CEMBRANO, G.; WELLS, G.; QUEVEDO, J; PÉREZ, R.; ARGELAGUET, R - Optimal Control of a Water Distribution Network in a Supervisory Control System. Control Engineering Practice. ISSN 0967-0661. 2000. Vol 8

COSTA, Ana Isabel Lopes Fragoso Ventura - Eficiência Económica Na Operação de Estações Elevatórias de Abastecimento de Água. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2009. Tese de Mestrado

CUNHA, Alice - Otimização Energética Em Tempo Real Da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009. Tese de mestrado

DOE, HI (2006), Improving Pumping System Performance – A Sourcebook for Industry, 2ª edição, US Department of Energy's Industrial Technologies Program, Hydraulic Institute (HI), 2006

ELECTROBRÁS. Eficiência Energética Em Sistemas de Bombeamento, 2005.

ADP - Estação Elevatória de Alcanhões, Santarém. [Consult. 26 Maio, 2016]. Disponível na <http://www.adp.pt/pt/galeria/imagens/-/fotografias/detalhe-galeria-imagens/?id=61&img=13&bl=2>.

EUROPUMP E HYDRAULIC INSTITUTE - **Variable Speed Pump - A Guide to Successful Applications**. Elsevier Science, 2004. ISBN 978-1856174497

FIGUEIREDO, Manuel M. Pacheco e POÇAS MARTINS, Joaquim M. V - Minimização Do Custo Da Energia Em Estações Elevatórias de Abastecimento de Água. Barcelos, 2007.

JAMIESON, D. G.; SHAMIR U.; MARTINEZ F.; FRANCHINI M. - Conceptual Design of a Generic, Real-Time, near-Operation Control Systems for Water Distribution Network. Journal Hydroinformatics, 2007. Vol 9 No 1.

JETBRAINS - Com PyCharm, Desenvolvedores de Python Finalmente Ganham Um IDE Poderoso., [Consult. 14 Setembro, 2016]. Disponível na <http://www.prnewswire.com/news-releases/com-pycharm-desenvolvedores-de-python-finalmente-ganham-um-ide-poderoso-104936104.html>.

JOWITT, P. W. e GERMANOPOULOS. G. - Optimal Pump Scheduling in Water Supply Networks. Journal of Water Resources Planning and Management, 1992.

JUNG, Donghwi; KANG, Mingu e KIM, Byungseop. - Real-Time Pump Scheduling for Water Transmission Systems: Case Study." KSCE Journal of Civil Engineering, Dezembro 2014.

KUMAR, J. - Auditing Pumping Systems to Unveil Hidden Energy Saving Potential: ee mods'09 conference, energy efficiency in motor driven systems. França, 2009.

LEITE, Pedro; VIVAS, Eduardo; MONTEIRO, Paulo e TENTÚGAL VALENTE, Luís. - Otimização Energética No Dimensionamento de Estações Elevatórias de Águas Residuais: 10º Congresso da Água. Alvor, 2010.

LNEC. Manual Do Utilizador Do EPANET 2.0 - Simulação Hidráulica E de Parâmetros de Qualidade Em Sistemas de Transporte E Distribuição de Água, 2004.

NITIVATTANANON, V.; SADOWSKY, E. e QUIMPO R.G. - Optimization of Water Supply System Operation. Journal of Water Resources Planning and Management, 1996.. Vol 122 No. 5.

OBITKO, Marek - Introduction to Genetic Algorithms - Tutorial with Interactive Java Applets. ., [Consult. 12 Outubro, 2016]. Disponível na <http://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms/>

OLIVEIRA, Maria Manuela - Apontamentos Teóricos Hidraulica Urbana, 2015.

PASHA, M. F. K. e LANSEY K. - Optimal Pump Scheduling by Linear Programming, Kansas City, USA. ASCE, 2009. 395–404.

SALOMONS, E.; GORYASHKO, A.; RAO, Z.; Alvisi, S. - Optimizing the Operation of the Haifa-A Network. Journal Hydroinformatics, 2007. Vol. 9 No.1.

SHAMIR, U. e SALOMONS, E. - Optimal Real-Time Operation of Urban Water Distribution Systems Using Reduced Models. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008. Vol 134 No. 2.

SOUSA, Catarina; COVAS, Dídia; RAMOS Helena; PEDRAS Susana; BARBOSA Cristiana; TENTÚGAL VALENTE. José - Otimização Da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água Utilizando Algoritmos Genéticos. Caso de Estudo: Sub-Sistema Da Póvoa / Vila Do Conde, Barcelos, 2007.

SOUSA, Eduardo Ribeiro - Sistema Ambiental I - Sistemas de Abastecimento de Água. Setembro de 2001.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki.-Redução Do Custo de Energia Elétrica Em Estações Elevatórias de Água E Esgoto. São Paulo, Brasil: ABES, 2001.

VASCONCELOS, Flávia. - Estação de Tratamento de Água (ETA) – Etapas. [Consult. 12 Julho, 2016]. Disponível na <https://esquadraodoconhecimento.wordpress.com/ciencias-da-natureza/quim/estacao-de-tratamento-de-agua-eta-etapas/>

VIEIRA, André. “Manual de Sintaxe Para EPANET ‘link’ ao Interpretador MATLAB.” FEUP, Portugal, Setembro de 2003.

VIVAS, Eduardo; LEITE Pedro, VALENTE Luís; TENTÚGAL VALENTE José; PACHECO FIGUEIREDO Manuel; AGUILAR Nuno e FERREIRA Ricardo - Estudos de Otimização Energética Em Estações Elevatórias. Uma Metodologia Para a Sua Seleção: 12º Congresso da Água. Lisboa, 2014.

YU, Xinjie e GEN Mitsuo. Introduction to Evolutionary Algorithms. Springer Science & Business Media, 2010.

ZYL, Jakobus E. van; SAVIC, Dragon A e WALTERS, Godfrey A - Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm. Jornal of Water Resources Planning and Management, Março 2004